

ESTRUTURAS EM BAMBU

SEBASTIÃO FRÓES BRANDÃO DE SOUSA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Raimundo Moreno Delgado

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Esta tese devo-a fundamentalmente a 2 pessoas, a quem, por isso, agradeço especialmente:

À minha irmã Isabel – Arquiteta – que me deu a ideia de fazer a tese sobre a aplicabilidade do bambu à engenharia estrutural, ela que projetou e introduziu o caso prático que aqui apresento e que defende acerrimamente a importância de utilizarmos a natureza pura na construção.

Ao Professor Raimundo Delgado o entusiasmo com que abraçou a ideia, a sabedoria e entendimento com que, ao longo dos meses, foi capaz de me moldar e também a permanente alegria com que sempre me recebeu na elaboração desta, para mim, enorme tarefa.

RESUMO

No início da civilização, os materiais utilizados em estruturas da construção eram os que se encontravam na natureza, como a madeira, pedra e o bambu. Com a evolução dos tempos e da tecnologia foram desenvolvidos novos materiais, como o aço e o betão, que pela certeza das suas características rapidamente se transformaram nos materiais mais utilizados, apesar de terem custos de produção e ambientais mais elevados que a madeira e o bambu. Hoje estes fatores têm importância acrescida e por isso renasce o interesse nos materiais naturais.

Especificamente o bambu é um material esteticamente favorável que pode ser utilizado de diversas maneiras e, por ser extremamente resistente e de rápido crescimento, pode ser uma séria alternativa para estruturas da construção.

Esta tese de mestrado foi realizada com a intenção de mostrar que a cana de bambu, já utilizada há milhares de anos com diferentes finalidades, é um material extremamente competente para ser utilizado em estruturas da construção. E prova-se mesmo que, sendo um material muito leve e resistente, é especialmente adequado para coberturas de grandes vãos, pontes, grandes pavilhões, etc.

Inicia-se este estudo com uma apresentação das aplicabilidades e das curiosidades do bambu, de modo a atrair as atenções para algumas grandes obras já realizadas.

Por ser um material orgânico há que ter em conta que existem inúmeras variáveis que podem afetar as suas características mecânicas e a durabilidade, como a espécie, a colheita, a cura, os tratamentos, o local de plantação, a humidade relativa do ambiente, a dimensões da planta, etc..

Com vista a sensibilizar os projetistas que utilizem o bambu, estudou-se sumariamente a sua anatomia – tubular oco - para que se possam aproveitar ao máximo as suas propriedades mecânicas.

Não foram realizados ensaios, pelo que se recolheu o máximo de informação possível, com vista ao entendimento das suas capacidades de resistência, muito dependentes de diversos fatores, nomeadamente a sua espécie biológica.

Depois, enumeram-se as ligações já desenvolvidas para unir diferentes elementos numa estrutura, sendo certo que a procura de novas e melhores ligações é ainda hoje um dos grandes desafios para o bambu, enquanto que para a madeira e para o aço já existem soluções muito otimizadas, que têm sido desenvolvidas ao longo de séculos.

A existência de normas é fundamental para que se garanta o dimensionamento seguro e funcional das estruturas. Como tal, para que o bambu seja melhor aceite como material estrutural, é necessário que haja normas reguladoras que definam os procedimentos de cálculo deste tipo de estruturas. Hoje existem já normas internacionais ISO e algumas normas de países onde o bambu é utilizado com frequência. Por isso, procurou-se reunir os aspetos mais relevantes das normas existentes, comparando-as entre si, de modo a que se possa fazer um dimensionamento adequado.

Por fim, a título de exemplo, concluiu-se este trabalho com o dimensionamento de uma cobertura arquitetonicamente arrojada que permite provar que o bambu é altamente competente para ser usado em estruturas da construção.

PALAVRAS-CHAVE: Bambu, Estruturas, Engenharia, Sustentável, Estado da arte.

ABSTRACT

At the beginning of civilization, the materials found in nature, like hardwood, stone and bamboo were the chosen ones. With the development of science and technology, new materials have been found, like steel and concrete these are now the most commonly used. They however have the great disadvantage of high cost production, while bamboo and hardwood are renewable and sustainable materials, factors that have been gaining importance in civil construction. For these reasons, it is important to study the possibility of using bamboo as a structural material.

Having the aesthetical advantage, bamboo can be used in many different ways, and due to its fast growth rate and great resistance it can be seen as a great alternative to other conventional materials.

This thesis was written in order to demonstrate that the bamboo pole, which has been used for thousands of years for many different purposes, is an extremely competent material to be used in structures. It is extremely light and resistant and these characteristics make it fantastic for modern structures, like large span roofing, bridges, big pavilions, etc.

To start, the general aspects of bamboo are presented describing some uses and curiosities, while also presenting the wide use in civil engineering structures. Some pictures of outstanding structures are included with the intention of introducing the reader to bamboo's great potential in engineering.

Bamboo is an organic material and it should taken into consideration that many variables are can affect its mechanical characteristics and durability like the species, harvest, cure, plantation site, air humidity, plant dimensions, etc.

Bamboo has a hollow tubular cross section, with an optimized distribution of fibers. Therefore, it is important to study its phytotomy (plant anatomy), in order to better understand how to use the material to its fullest potential.

No bamboo specimens were tested and therefore it was collected as much information as possible for an understanding of its resistant capabilities. It can be concluded that they depend on several factors, including the identification of its biological species.

Afterwards, it was studied the existing joints that have been investigated to connect different elements of a structure. It's a fact that the research for new and better joints is still one of the biggest challenges to bamboo structures. Whereas for hardwood and steel there are already a great variety of solutions developed throughout the centuries. For bamboo this is an area that still needs a lot of research. There are some studies showing a physical evolution of different existing types.

The existence of standards is fundamental for the design of secure and functional structures. Hence, for bamboo to become socially accepted as a structural material and to have credibility with construction authorities, it is necessary that standards prescribe procedures for the design of structures. Today there is an international standard ISO and other national standards for some countries where bamboo is frequently used. Therefore, it was intended to collect the most relevant aspects of the existing standards, so they could be compared, taking the best of each in order to design adequate bamboo structures.

At the end, the work was concluded with the example of a daring architectural roof design that proceeded to show, based on calculations, that bamboo is an extremely competent structural material.

KEYWORDS: Bamboo, Structures, Engineering, Sustainable, State of art.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
1 Introdução	1
1.1 GENERALIDADES DO BAMBU	1
1.2 APLICABILIDADES DO BAMBU	2
1.3 OBJETIVO	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	5
2 Estado da Arte	7
2.1 ANATOMIA, COLHEITA E TRATAMENTO	12
2.1.1 ANATOMIA.....	12
2.1.2 COLHEITA E TRATAMENTO	15
2.1.2.1 Colheita	15
2.1.2.2 Tratamento.....	16
3 Propriedades Mecânicas	19
3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
4 Ligações	43
4.1 GRUPO 1 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS ATRAVÉS DE COMPRESSÃO POR CONTACTO COM A SECÇÃO TOTAL	45
4.2 GRUPO 2 - TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR ATRITO À SUPERFÍCIE INTERIOR OU COMPRESSÃO DOS ENTRENÓS DA CANA.....	46

4.3 GRUPO 3 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR ATRITO À SUPERFÍCIE E EXTERIOR DA CANA.....	48
4.4 GRUPO 4 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR CORTE À PAREDE DA CANA POR UM ELEMENTO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS POR DENTRO (4A) OU POR FORA (4B).....	50
4.5 GRUPO 5 – TRANSMISSÃO DAS FORÇAS PERPENDICULARMENTE ÀS FIBRAS.....	54
4.6 GRUPO 6 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR COMPRESSÃO RADIAL PARA O CENTRO DA CANA ATRAVÉS DE CORTE E POR TENSÕES PERPENDICULARES ÀS FIBRAS	54
4.7 COMBINAÇÕES DE GRUPOS	58
4.7.1 GRUPOS 1 E 2	58
4.7.2 GRUPOS 1 E 3	59
4.7.3 GRUPOS 1 E 4	59
4.7.4 GRUPOS 2 E 4	60
4.7.5 GRUPOS 3 E 4B.....	60
4.7.6 GRUPOS 1, 2 E 4A	61
4.7.7 GRUPOS 2, 3 E 4A	61
4.7.8 GRUPOS 2 E 6	62
4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

5 Normas 65

5.1 MATERIAL..... 66

5.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL..... 67

5.2.1 ESTADOS LIMITES	67
5.2.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	67
5.2.3 REQUISITOS DE DESEMPENHO.....	68
5.2.4 TENSÕES ADMISSÍVEIS.....	69
5.2.4.1 Abordagem da ISO (2001c)	69
5.2.4.2 Abordagem Indiana	70
5.2.4.3 Abordagem Colombiana	70
5.2.4.4 Abordagem Peruana	74
5.2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS	74
5.2.6 VIGAS (PREDOMINANTEMENTE À FLEXÃO)	75
5.2.6.1 Flechas.....	78
5.2.6.2 Corte.....	78
5.2.6.3 Esmagamento	79

5.2.6.4	Estabilidade Lateral	79
5.2.7	PILARES (ELEMENTOS SUJEITOS A ESFORÇOS AXIAIS).....	81
5.2.7.1	Comprimento de encurvadura	81
5.2.7.2	Esbelteza	82
5.2.7.3	Esforços Máximos de compressão Permitidos.....	82
5.2.8	INTERAÇÃO DE ESFORÇOS DE FLEXÃO COM ESFORÇOS AXIAIS.....	83
5.3	LIGAÇÕES	83
5.3.1	TIPOS DE CORTE	84
5.3.2	LIGAÇÕES APARAFUSADAS – ABORDAGEM DA NORMA COLOMBIANA.....	85
5.3.3	LIGAÇÕES – ABORDAGEM DA NORMA PERUANA	87
5.4	CONJUNTO DE ELEMENTOS DE BAMBU	89
5.5	DETALHES.....	90
5.5.1	PAREDES ESTRUTURAIS	90
5.5.2	FUNDAÇÕES.....	91
5.5.3	LIGAÇÕES PILAR/PAREDE – FUNDAÇÃO/TELHADO.....	92
5.5.4	VIGAS E LAJES	93
5.6	DURABILIDADE E PRESERVAÇÃO	94
5.7	CLASSIFICAÇÃO.....	95
6	Caso Prático	97
6.1	PROJETO.....	97
6.2	VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DA COBERTURA	99
6.3	ALTERAÇÃO DAS DIMENSÕES.....	100
6.4	AÇÕES.....	102
6.4.1	PESO PRÓPRIO E SOBRECARGA.....	102
6.4.2	AÇÃO DO VENTO.....	103
6.5	DIMENSIONAMENTO DAS MADRES	105
6.6	DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS	108
6.7	PENÚLTIMOS PÓRTICOS DA EXTREMIDADE.....	113
6.7.1	SÍSMICA	115
6.7.1.1	Sentido do plano do pórtico	116
6.7.1.2	Sentido Longitudinal da Cobertura	118
6.7.1.3	Dimensionamento do pórtico	120
6.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123

7 Conclusão	125
--------------------------	------------

Bibliografia	127
---------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Automóveis em bambu com canas (esquerda) e laminado (direita) - (cit. Minke, G., 2012) .	3
Figura 2 – Bicicleta em bambu – cit. http://www.bamboobikemaker.com/bikes.html	3
Figura 3 – Bicicleta em bambu - (Vidiella, À.S., 2011).....	3
Figura 4 – Cintos de bambu - (cit. Minke, G., 2012)	7
Figura 5 – Laje reforçada com bambu - (Ghavami, K., 2005).....	8
Figura 6 – Andaime em Hong Kong - (Chung, K. [et al.], 2002)	9
Figura 7 – Ponte pedonal de Jorg Stamm - (Minke, G., 2012)	9
Figura 8 – Ponte de Jorg Stamm e Xavier Pinto - (Minke, G., 2012).....	10
Figura 9 – Ponte pedonal de Jorg Stamm- (cit. Vidiella, À.S., 2011).....	10
Figura 10 – Ponte de John and Chynthia Hardy - (Vidiella, À.S., 2011)	10
Figura 11 – Coberturas de grande vão - (Vidiella, À.S., 2011) e (Minke, G., 2012)	11
Figura 12 – Pavilhão (em cima) e igreja (em baixo) de Símon Vélez (ARIAS, J. [et al.], 2011)	12
Figura 13 – Detalhe do conjunto vascular por Liese (1980) – (cit. Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)	13
Figura 14 - (Liese, W., 1985).....	13
Figura 15 - (Janssen, J.J.A., 1981)	14
Figura 16 – Variação dos veios e da espessura da parede celular por Chun (2003) –(cit. Berndsen, R.S., 2008)	14
Figura 17 – Amostra por Atrops 1969 – (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993)	23
Figura 18 – Amostra por Xiu-Xin – dimensões em mm - (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993).....	23
Figura 19 – Proposta para ensaio ao corte - (Janssen, J.J.A., 1981).....	25
Figura 20 – Determinação do coeficiente Poisson - (Janssen, J.J.A., 1981)	26
Figura 21 – Amostra para tração tangencial - (Arce-Villalobos, O.A., 1993).....	26
Figura 22 – Configuração das amostras - (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)	30
Figura 23 – Ensaio à compressão lateral - (Torres, L. [et al.], 2007).....	31
Figura 24 – Teor em humidade vs. Resistência à compressão – (cit. Berndsen, R.S., 2008)	33
Figura 25 – Curva de crescimento do bambu por Chun - 2003 –(cit. RABELO, I.D., 2009)	37
Figura 26 – representação das amostras - (Sharma, B. [et al.], 2013).....	39
Figura 27 – Esquema de “Split pin test” - (Mitch, D. [et al.], 2010)	40
Figura 28 – Ligações Grupo 1 - (cit. Janssen, J.J., 2000)	46
Figura 29 – Ligações Grupo 2 - (cit. Janssen, J.J., 2000)	46
Figura 30 – Ligação com injeção de betão com e sem nó por Nienhuys, 1976 - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	47
Figura 31 – Ligação por C. Tönges - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)	47
Figura 32 – Ligações propostas por Nienhuys, 1976 - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012).....	48
Figura 33 – Ligação por atrito - (Widyowijatnoko, A., 2012)	49
Figura 34 – Ligação por Waldemar Rothe - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	49
Figura 35 – Ligações de madeira por Mero - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004).....	50
Figura 36 – Cúpula geodésica por Shoei Yoh - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)	51
Figura 37 – Ligação proposta por (Obermann, R.L.T.M., 2003/2004).....	51
Figura 38 – Ligações grupo 4B - (cit. Janssen, J.J., 2000).....	52

Figura 39 – Ligação do grupo 4B com lâmina metálica - (cit. CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T., 2002)	53
Figura 40 – Ligação por (LOZANO, J.V.G. and BARRERA, R.A.G., 2002).....	53
Figura 41 – Ligação amarrada - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012).....	55
Figura 42 – Ligação com 4 nós - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	55
Figura 43 – Amostras dos ensaios - (Widyowijatnoko, A., 2012).....	56
Figura 44 – Amostra de 4 nós - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	56
Figura 45 – Configuração de um possível nó da estrutura - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	57
Figura 46 – Ligação por (Arce-Villalobos, O.A., 1993).....	58
Figura 47 – Ligação C. Tönges – (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004) à esquerda e (cit. Widyowijatnoko, A., 2012) à direita	59
Figura 48 – Ligação por Dunkelberg – 1985 - (cit. Janssen, J.J., 2000).....	59
Figura 49 – Ligação do grupo 4B com enchimento de argamassa - (cit. CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T., 2002).....	60
Figura 50 – Ligação dos grupos 3 e 4B - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012).....	61
Figura 51 – Modificação da ligação por Arce-Villalobos - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)	61
Figura 52 – Ligação proposta por R. Piano adaptada por Widyowijatnoko, A. (2012)	62
Figura 53 – Adaptação do sistema de montanhismo às ligações de bambu - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012).....	63
Figura 54 – Modificação da ligação por Nienhuys - (Widyowijatnoko, A., 2012)	64
Figura 55 – Ligação proposta por Widyowijatnoko, A. (2012).....	64
Figura 56 – Teor em humidade a partir da Temperatura e Humidade Relativa do ar (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).....	73
Figura 57 – Conectores de duas canas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).....	77
Figura 58 - Conectores de canas - (cit. Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	77
Figura 59 – Esquematização de vigas compostas - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012). 79	
Figura 60 – Módulo da Secção para vigas compostas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).....	80
Figura 61 – Diferentes cortes - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	84
Figura 62 – Cortes com “orelhas” - (cit. Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	85
Figura 63 – Abraçadeiras para estabilizar ligações aparafusadas (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	85
Figura 64 – Ligações aparafusadas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	86
Figura 65 – Ligação por bandas e ligação amarrada - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	87
Figura 66 – Ligações Aparafusada e com tarugos de madeira - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	87
Figura 67 – Ligações aparafusadas com argamassa de cimento - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	88
Figura 68 – Ligação longitudinal – 1ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	88
Figura 69 - Ligação longitudinal – 2ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	88
Figura 70 - Ligação longitudinal – 3ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	88
Figura 71 – Ligação perpendicular com tarugos e aparafusada - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	89
Figura 72 - Ligação diagonal simples - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	89
Figura 73 – Ligação diagonal com bambu de apoio - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	89
Figura 74 – Parede com soleira de madeira - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	90

Figura 75 – Parede com soleira de bambu - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	90
Figura 76 – Fundação 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	91
Figura 77 – Fundação 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	91
Figura 78 – Fundação de paredes tipo 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	92
Figura 79 – Fundação de paredes tipo 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	92
Figura 80 – Viga composta tipo A - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	93
Figura 81 – Viga composta tipo B - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	93
Figura 82 – Laje 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	94
Figura 83 – Laje 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	94
Figura 84 –Aldeamento – (cit. Vincke, I., 2012).....	98
Figura 85 – Cobertura - (cit. Vincke, I., 2012).....	98
Figura 86 – Dimensões em metros do pórtico.....	99
Figura 87 – Pórtico com 1,20 m de largura.....	100
Figura 88 – Pórtico com 0,60 m de largura.....	101
Figura 89 – Dimensões da cobertura e pórticos (esquerda) e divisão em várias estruturas isoladas (direita).....	101
Figura 90 – Duas vertentes da cobertura.....	102
Figura 91 – Diferentes zonas para ação do vento - (cit. CEN, 2002).....	104
Figura 92 – Diferentes zonas para ação do vento – Dimensões em m.....	105
Figura 93 – Configuração final Pórtico corrente.....	110
Figura 94 – Envolvente de esforços axiais.....	112
Figura 95 – Diagrama de Momentos fletores da consola para combinação condicionante.....	113
Figura 96 – Deformada da estrutura para a ação do vento descendente (esquerda) e ascendente (direita).....	113
Figura 97 – Travamento para receber forças horizontais.....	114
Figura 98 – Travamento não convencional do sentido longitudinal.....	114
Figura 99 – Rigidez do pórtico no seu plano para nós contínuos.....	116
Figura 100 - Rigidez do pórtico no seu plano para nós articulados.....	117
Figura 101 – Esforços resultantes das forças sísmicas no sentido do pórtico – nós articulados.....	117
Figura 102 – Rigidez do pórtico no seu plano para nós articulados e com funcionamento só de tração.....	118
Figura 103 – Pilar Isolado.....	119
Figura 104 – Esforços axiais do pórtico de extremidade.....	121
Figura 105 – Diagrama de momentos para vento ascendente.....	121
Figura 106 – Configuração do pórtico que resiste ao sismo.....	122
Figura 107 – Envolvente de esforços axiais para a ação do sismo.....	122
Figura 108 – Deformada resultante das ações sísmicas.....	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados por Soeprayitino –(cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993)	23
Tabela 2 – Ensaios à compressão para diferentes posições - (Chung, K.F. and Yu, W.K., 2002)	28
Tabela 3 – Resultados de ensaios sistemáticos - (Chung, K.F. and Yu, W.K., 2002).....	28
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas - (Yu, W.K. [et al.], 2005)	29
Tabela 5 - Resultados ensaios - (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)	30
Tabela 6 - Resultados aos ensaios à compressão - (Takeuchi Tam, P. and González, C.E., 2007)...	31
Tabela 7 - Densidade <i>Dendrocalamus giganteus</i> por Li – (cit. Berndsen, R.S., 2008)	32
Tabela 8 - Densidade <i>Phyllostachys pubescens</i> com (TH=12%) por Li -2004 - (cit. Berndsen, R.S., 2008)	32
Tabela 9 - Propriedades mecânicas por Ghavami 2002 – (cit. Berndsen, R.S., 2008)	34
Tabela 10 - Propriedades mecânicas de <i>Phyllostachys Pubescens</i> segundo Chun – (cit. Berndsen, R.S., 2008)	34
Tabela 11 – Densidade e resistência à flexão de <i>Phyllostachys P.</i> segundo LI, 2004 –(cit. Berndsen, R.S., 2008)	35
Tabela 12 - Resistência de <i>Dendrocalamus giganteus</i> - (cit. Berndsen, R.S., 2008).....	35
Tabela 13 – Dureza de Brinell - (Berndsen, R.S., 2008)	35
Tabela 14 – Propriedades mecânicas de <i>Phyllostachys pubescens</i> - (Berndsen, R.S., 2008)	36
Tabela 15 - Relação entre a resistência à tração e a densidade por Ghavami - (RABELO, I.D., 2009)	37
Tabela 16 – Comparação entre bambu, madeira e aço - (Obermann, R.L.T.M., 2003/2004).....	38
Tabela 17 – Propriedades mecânicas da <i>Guadua Angustifolia</i> (verde) - (Correal D, J.F. and Arbeláez C, J., 2010)	38
Tabela 18 – Resultados da compressão transversal - (Sharma, B. [et al.], 2013)	39
Tabela 19 – Propriedades Mecânicas – Resumo dos ensaios	41
Tabela 20 – Tabela de dimensionamento de ligações - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012).....	57
Tabela 21 – Divisão das espécies por resistência - (Standards, B.o.I., 2009)	66
Tabela 22 – Características mecânicas de 16 espécies - (cit. Standards, B.o.I., 2009)	68
Tabela 23 – Agrupamento das 16 espécies (cit. Standards, B.o.I., 2009)	70
Tabela 24 – Coeficientes de fatores condicionantes - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	71
Tabela 25 – Esforços admissíveis - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	71
Tabela 26 – Módulo de Elasticidade admissível - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	71
Tabela 27 – Coeficiente de modificação CD - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	72
Tabela 28 – Coeficiente de modificação Cm - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).....	72
Tabela 29 – Coeficiente de modificação Ct - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	73
Tabela 30 – Esforços admissíveis - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)	74
Tabela 31 – Módulo de Elasticidade - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012).....	74
Tabela 32 – Resistência última ao corte - (Standards, B.o.I., 2009)	75
Tabela 33 – Flechas máximas admissíveis - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	78
Tabela 34 – Coeficiente de modificação Cc - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	79
Tabela 35 – Coeficiente de modificação CL - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	80
Tabela 36 – Esbelteza - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	82
Tabela 37 – Dimensões das anilhas - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	85

Tabela 38 – Cargas máximas admissíveis - ligações 1 parafuso - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)	86
Tabela 39 – Coeficiente de grupo Cg - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).....	87
Tabela 40 – Limites de tensão – segundo Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012).....	99
Tabela 41 – Limites de momento fletor seção $\Phi 150\text{mm}$ e $t=15\text{mm}$	99
Tabela 42 – Valores do coeficiente de pressão resultante do vento	104
Tabela 43 – Pressão do vento segundo EC 1	104
Tabela 44 – Ações para madres espaçadas de 1 m.....	105
Tabela 45 – Tensões e deformações limite para madres	106
Tabela 46 – Controlo de Deformações, Momento Fletor e Esforço transverso para madres espaçadas de 1 m.	106
Tabela 47 - Controlo de Deformações, Momento Fletor e Esforço transverso para madres espaçadas de 0,5 m	107
Tabela 48 – Ações para pórticos	108
Tabela 49 – Esforços Limite para a secção $\Phi 16\text{ cm}$ e $t=2,5\text{cm}$	109
Tabela 50 – Esforços atuantes	111
Tabela 51 – Resumo das propriedades da barra axialmente mais esforçada	111
Tabela 52 – Componentes dos 2 tipos de ação sísmica.....	115
Tabela 53 - Valores de a_g e S	115
Tabela 54 – Esforços limite para a nova secção.....	120

1

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, vários materiais têm sido utilizados como materiais de construção. No início da civilização, os materiais mais procurados eram os materiais que se encontravam na natureza, como a madeira, pedra e também o bambu. Com a evolução dos tempos e da tecnologia foram descobertos novos materiais, como o aço e o betão, e embora estes, sejam hoje, os materiais mais utilizados, têm custos elevados de produção e ambientais, enquanto a madeira e o bambu são materiais com custos incomparavelmente mais baixos. São materiais renováveis e sustentáveis, fator que tem ganho importância na construção civil, sendo por isso importante estudar a sua aplicabilidade às estruturas dos dias de hoje.

O bambu é um material esteticamente favorável que pode ser utilizado de diversas maneiras e que, por ser extremamente resistente e de rápido crescimento, deve ser visto como séria alternativa a outros materiais hoje muito mais utilizados no mercado da construção.

Esta tese de mestrado foi realizada com a intenção mostrar que a cana de bambu, que já é utilizada há milhares de anos para diferentes finalidades, é um ótimo material estrutural mesmo para as estruturas mais modernas. E pode ser utilizada em Portugal ou em qualquer outro país, de forma definitiva ou provisória, fazendo frente aos materiais convencionais como o betão, o aço ou a madeira. É um material extremamente leve e resistente que pode ser muito competitivo em estruturas de grande dimensão como coberturas de grandes vãos, pontes, grandes pavilhões, etc.

O tema “Estruturas em Bambu” foi proposto pelo autor desta tese, com a motivação de estudar um material diferente dos materiais convencionais. Este trabalho conclui o percurso académico do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, em que os materiais estudados foram essencialmente o aço e o betão, sendo que o autor considerou importante e um grande desafio estudar um material novo. Para além disso é um material sustentável e renovável tornado o estudo do bambu mais interessante e motivante.

Sendo este um tema inovador em Portugal, são apresentados aspetos de introdução ao bambu que são importantes para o enquadrar quer na sociedade, quer na engenharia.

1.1 GENERALIDADES DO BAMBU

Sendo o bambu uma planta, para se iniciar o seu estudo é necessário conhecer a hierarquia biológica. Em termos de classificação, as plantas são divididas em famílias que são divididas em subfamílias, que por sua vez são divididas em géneros e estes são divididos em espécies e variedade. O Bambu pertence, tal como o trigo, o milho e a maior parte das relvas, à família das gramíneas, nome do latim

“Poaceae” ou “Gramineae”. Em termos de subfamília pertence à “Bambusoideae”. Existem mais de 90 géneros e mais de 1300 espécies de bambu no mundo inteiro, que se encontram em maior abundância nos trópicos e subtropicais. O bambu é nativo em todos os continentes exceto na Europa e aparece, grosso modo, entre as latitudes 50° sul e 50° norte.

Esta planta é constituída por uma raiz que está interligada a um rizoma subterrâneo, de onde brotam os caules ou canas, constituídos por pequenos ramos e pela folhagem. O crescimento do bambu pode dividir-se em duas categorias, de acordo com os tipos de rizomas - rastejantes e não rastejantes. Os não rastejantes formam um tufo e ocupam uma pequena área, enquanto os rastejantes alastram-se e ocupam todo o espaço disponível. Os não rastejantes estão associados aos climas tropicais e os rastejantes a climas temperados (Bambuparque). A produtividade da espécie *Guadua angustifolia kunth* é de cerca de 1200 a 1500 canas por hectare (Minke, G., 2012).

A altura do bambu pode atingir os 30 metros, mas depende da espécie e também do local onde está plantado. O recorde de crescimento é de 121cm em 24h e é considerado o vegetal de maior crescimento do planeta. O caule só cresce durante uma primavera, atingindo a sua altura total nesse pequeno espaço de tempo, e a partir daí fica a amadurecer de 3 a 6 anos (Tirelli, Z.P., 2007). Em sítios onde a desflorestação seja um problema a plantação de bambu é uma ótima solução pelo seu rápido crescimento. É um material “eco-friendly”, extremamente leve e resistente tornando-se um bom substituto da madeira. Para além disso, as restrições das leis de corte de árvores estão cada vez mais apertadas e a procura da madeira tem aumentado, fazendo com que o seu preço tenha subido, pelo que o bambu é novamente uma solução para esse problema, podendo ter as mesmas aplicações que a madeira (Berndsen, R.S., 2008). Uma das grandes vantagens do bambu relativamente à madeira é que pode ser colhido entre os 3 e 6 anos, que é quando as suas propriedades mecânicas e características anatómicas estão estáveis para que seja utilizado na construção (Jiang, Z. [et al.], 2012), enquanto que para o abatimento de árvores se tem de esperar incomparavelmente mais tempo. Outra vantagem é que o bambu protege os solos da erosão e do assoreamento de portos e lagos (Moreira, L.E. [et al.], 2012). Minke, G. (2012) explica que o denso sistema subterrâneo de raízes faz com que proteja bem o terreno da erosão provocada pela chuva e cheias. Com uma taxa de crescimento muito alta, o bambu consegue converter mais CO₂ em O₂ do que as árvores. O mesmo autor refere ainda que o bambu produz muito mais biomassa seca por hectare do que o eucalipto. Janssen, J.J.A. (1981) acrescenta outra vantagem do bambu relativamente à madeira, comparando a energia necessária para a produção dos dois materiais, sendo que são necessários 300 MJ/m³ para o bambu enquanto que para a madeira são necessários 600 MJ/m³.

1.2 APLICABILIDADES DO BAMBU

Nas regiões tropicais e subtropicais, onde é mais abundante, o bambu é utilizado há milhares de anos, com uma vasta gama no campo de aplicação no vestuário, alimentação, construção (Tirelli, Z.P., 2007) e na produção de instrumentos musicais e móveis. O conteúdo de celulose que o bambu contém faz dele uma matéria-prima muito adequada para a indústria de papel (X. B. Li, T.F.S., G. F. Peter, C. Y. Hse & T. L. Eberhardt, 2007). É um material com grande potencial para a produção de biodiesel (Fei, B.H. [et al.], 2013) e tem sido utilizado para a fabricação de bicicletas, (Tan, T. [et al.], 2011) e automóveis – ver Figura 1. As bicicletas têm sido cada vez mais procuradas e recentemente a empresa americana “WebbWorks” tem produzido uma grande variedade de quadros de bicicletas feitas de bambu ligado com fibras de carbono - ver Figura 2. Apareceu como novidade na revista online

“cyclocross magazine” um artigo sobre estas bicicletas que para além de serem muito leves, são altamente resistentes.



Figura 1 – Automóveis em bambu com canas (esquerda) e laminado (direita) - (cit. Minke, G., 2012)



Figura 2 – Bicicleta em bambu – cit. <http://www.bamboobikemaker.com/bikes.html>



Figura 3 – Bicicleta em bambu - (Vidiella, À.S., 2011)

Em 1906, Alberto Santos Dumont fez o primeiro voo homologado da história com um aeromodelo com estrutura de bambu e alumínio (Vasconcellos, R.M.d., 2006). Thomas Edison testou várias fibras vegetais para usar como filamentos, em lâmpadas, e descobriu que as fibras de um bambu japonês eram as melhores. Durava cerca de 2 450 horas acesa. Depois desta descoberta, o filamento das fibras de bambu foi utilizado durante 14 anos pela “General Electric Company”. (Minke, G., 2012)

O bambu mostra ser um material sustentável e renovável para a construção civil, na medida em que dentro desta indústria tem inúmeras utilidades. Tem uma taxa de crescimento muito alta e em grande quantidade. Quando se utiliza a cana, o custo ambiental é incomparavelmente inferior do que qualquer outro material tradicional (Van Der Lugt, P. [et al.], 2003).

Devido às suas propriedades físicas e mecânicas é um material muito apto para ser utilizado como material estrutural da construção. Por ser um material muito barato e fácil de obter está normalmente associado a construções em países subdesenvolvidos e pobres.

Em algumas zonas pobres de países orientais, como a China, tem vindo a ser rejeitado por ser socialmente denegrido (Tang, L.Z., 2012). Uma das razões é que muitas das construções provisórias, como tendas de refugiados, são feitas de bambu. Sendo que é um material que tem uma resposta boa e rápida é também ideal para este tipo de situações de emergência. Para além disso, é um material muito competente para estruturas definitivas. Por ser um material que pode ter alto desempenho estrutural, esse pensamento de rejeição deve ser evitado, em particular no contexto da má situação económica e financeira que se atravessa, sendo uma boa altura para se estudarem materiais alternativos e de baixo custo. Até agora não tem tido muita utilização na Europa porque aqui não é abundante. Contudo, existe um viveiro (plantação e produção de bambus em planta) no Alentejo, Portugal, o Bambuparque.

Como qualquer outro vegetal, a sua maior desvantagem é a durabilidade. Existem métodos de tratamento e de preservação que podem prolongar significativamente a vida útil do bambu, principalmente se for utilizada em sítios protegidos da humidade e do contacto com o solo. Mais à frente no trabalho se abordará esse assunto.

Relativamente à divulgação do bambu existe um grupo na rede social Facebook com o nome de “World Bamboo” (<https://www.facebook.com/groups/112134877655/>) e também existe a “Rede Social do Bambu” (<http://bamboo.ning.com/>) onde se publicam informações sobre conferências, novas obras realizadas em bambu, e discutem-se assuntos relacionados com o tema bambu. Existe também uma entidade chamada de “American Bamboo Society”, cuja página web é <http://bamboo.org/BambooSourceList/index.php>, que publica revistas quinzenais. Esta entidade patrocina conferências, visitas guiadas e venda da planta, tendo como finalidade a promoção do bambu.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar que o bambu é um material apto para ser usado em estruturas da construção, mesmo em obras muito exigentes, o que pode ser comprovado através de obras já realizadas, apresentar os principais aspetos relativos ao dimensionamento de estruturas e apresentar uma aplicação.

Neste sentido, procedeu-se à recolha de informação que permitiu estudar a sua adequabilidade, de modo a compilar um estudo que possa servir de apoio a quem projete com bambu.

Para se perceber se este tem competências para servir como material estrutural, estudou-se as suas propriedades mecânicas. É também relevante identificar quais os tipos de ligações existentes e a resistência das mesmas de modo a identificar a sua utilização apropriada em estruturas correntes, e com o recurso de normas existentes procurou-se a forma de fazer um dimensionamento adequado. Por fim, calculou-se uma cobertura relativamente exigente com o objetivo de provar as boas características do bambu como material estrutural.

1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está dividido em sete capítulos, que sucintamente se passa a descrever:

Neste primeiro capítulo, inicia-se o estudo com uma apresentação ao material em geral, descrevendo algumas aplicabilidades e curiosidades características do mesmo e também a vasta utilidade que o bambu tem. É também descrito o objetivo deste trabalho.

No capítulo 2 – “Estado da arte”- é feito um breve apanhado dos diferentes usos que o bambu tem tido nas estruturas da engenharia civil. Com algumas figuras de estruturas notáveis pretende-se atrair a atenção do leitor para as grandes potencialidades que o bambu tem nesta área. Por ser um material orgânico há que ter em conta que existem inúmeras variáveis que podem afetar as suas características mecânicas, como a espécie, a colheita, a cura, o local de plantação, a humidade relativa do ambiente, a dimensões da planta, etc. Outro aspeto muito relevante é a sua durabilidade, que é uma grande condicionante para as estruturas definitivas. Através de tratamentos adequados, a vida útil do bambu nas estruturas pode ser muito prolongada. O bambu é tubular oco, com uma constituição otimizada para acomodar os esforços a que está sujeito durante a sua vida como planta. Sendo assim, é importante estudar a sua anatomia ainda que de forma abreviada, para se poder entender melhor como aproveitar ao máximo as suas propriedades mecânicas.

No capítulo 3, são estudadas as propriedades mecânicas do bambu. Não foram realizados ensaios para a determinação das propriedades mecânicas do bambu, pelo que se recolheu o máximo de informação, que permite perceber a evolução dos ensaios e ter conhecimento das suas capacidades resistentes. E pode-se concluir que estão muito dependentes de diversos fatores, incluindo a identificação da sua espécie biológica.

Depois, no capítulo 4, estuda-se as ligações que atualmente já se desenvolveram para unir diferentes elementos duma estrutura, sendo certo que a procura de novas e melhores ligações é ainda hoje um dos grandes desafios para estruturas de bambu. Enquanto que para a madeira e para o aço existem inúmeras soluções que têm sido desenvolvidas ao longo de séculos, para o bambu esta é ainda uma área que necessita de bastante estudo. Mostra-se, por isso, alguns trabalhos já realizados neste campo de investigação para mostrar a evolução física das ligações e os diferentes tipos existentes.

O capítulo 5, aborda os aspetos relativos às normas. A existência de normas é fundamental para que se garanta o dimensionamento seguro e funcional das estruturas. Como tal, para que o bambu seja socialmente aceite como material estrutural, e que tenha credibilidade perante as autoridades construtoras, é necessário que haja normas que definam os procedimentos de cálculo deste tipo de estruturas. Hoje existem já normas internacionais ISO e algumas normas de países onde o bambu é utilizado com frequência. Por isso, neste capítulo, procura-se reunir os aspetos mais relevantes das normas existentes de modo a que se possa retirar daqui algumas conclusões comparativas entre as normas e que se possa fazer um dimensionamento adequado e seguro de estruturas em bambu.

Por fim, no capítulo 6, a título de exemplo, conclui-se este trabalho com o dimensionamento de uma cobertura arquitetonicamente arrojada que, através de cálculos e do software “Autodesk Robot Structural Analysis”, permite demonstrar que o bambu é um material altamente competente para o uso como material estrutural.

No capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE

Na área da construção o bambu pode ser utilizado de diversas maneiras e formas e com diferentes finalidades. Como material estrutural pode ser utilizado em vigas, lajes, pilares, paredes, estruturas treliçadas, mas também pode ser utilizado como material não estrutural, como por exemplo em telhados para servir de telha, caleira, de tubo de queda, de tubagens de esgoto, de tubagens de alimentação de água, em pavimentos, persianas e portadas, fachadas, etc.. Estes aspetos estão mais detalhados no trabalho de Jayanetti, D.L. and Follett, P.R. (1998).

Na construção civil são fatores determinantes para a escolha de materiais os custos e a durabilidade, tendo os materiais renováveis e sustentáveis ganho importância nas últimas décadas. Sendo o bambu um material renovável e sustentável, que cresce muito rapidamente, durável quando tratado e que tem um muito baixo custo de produção, apresenta-se como uma magnífica alternativa aos materiais tradicionais como o aço, o betão e a madeira (Van Der Lugt, P. [et al.], 2003)

Quando utilizado em estruturas pode assumir diferentes formas. A mais comum é a utilização na forma natural (cana), mas também pode assumir outras formas como a de tábua fazendo-se sucessivos cortes longitudinais ao longo da cana sem o destaque das mesmas. Segundo Minke, G. (2012) tem sido muito utilizado em casas rurais de climas tropicais como cofragem para betão, em elementos estruturais entre vigas e madres nos telhados, etc. Pode também assumir a forma de tiras que são destacadas das canas através de cortes longitudinais, paralelo às fibras, e que tem tido uma grande utilidade nos últimos tempos, principalmente na China, como por exemplo para se utilizar secções de bambu laminado lamelado colado, ou contraplacados de bambu (“plybamboo”). Este laminado também é muito utilizado em pavimentos, móveis, e tábuas para diferentes tipos de utilização. As fibras do bambu podem ser utilizadas para fazer cordas e outros elementos utilizados para amarrar. Os chamados “cintos” são feitos com pequenas tiras, de tamanho bastante pequeno, feitas com material da parte exterior da cana (parte com maior resistência) com aproximadamente 1 cm de largura. Amarram-se vários destes elementos formando um cordão com grande flexibilidade – ver Figura 4.

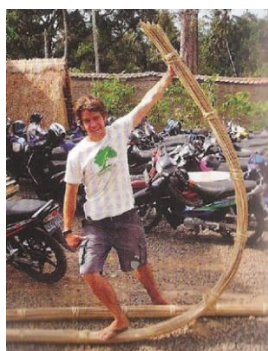


Figura 4 – Cintos de bambu - (cit. Minke, G., 2012)

A cana de bambu também pode ser utilizada de forma individual, ou em conjunto com outros materiais. Em zonas de alta sismicidade nos países Sul-Americanos é muito comum a utilização de painéis de bambu em paredes, denominadas de construções de “bahareque”, cujo enchimento é adobe ou betão – sistema análogo ao utilizado em Lisboa nas casas pombalinas depois do terramoto de 1755. Em lajes, vigas ou pilares o aço pode ser substituído pelo bambu. Na Figura 5 (cit. Ghavami, K., 2005) pode-se ver o caso de uma laje mista em que a cana foi dividida a meio para servir de cofragem e ao mesmo tempo garantir a resistência à tração da mesma. No caso das vigas e pilares, as canas com toda a sua secção ou tiras da cana substituem os varões de aço. Nos trabalhos realizados por Lima Júnior, H.C. [et al.] (2010), Khare, L. (2007) e Jung, Y. (2006) pode-se encontrar mais informação acerca do bambu como reforço de betão.

Um dos problemas da utilização do bambu com betão ou qualquer material molhado é a retração do betão e do bambu. O bambu é um material higroscópico que absorve a humidade do ambiente ou do material que esteja em contacto com o mesmo. Ao absorver a água, o bambu ganha volume e só começa a libertar a água, e consequentemente a retrair-se, quando o betão seca. E estando o bambu a retrair-se, pode destacar-se do betão. É, portanto, um problema que tem de ser tido em conta, quando se utiliza o bambu como a “armadura” do betão, o que não faz parte do âmbito deste trabalho.

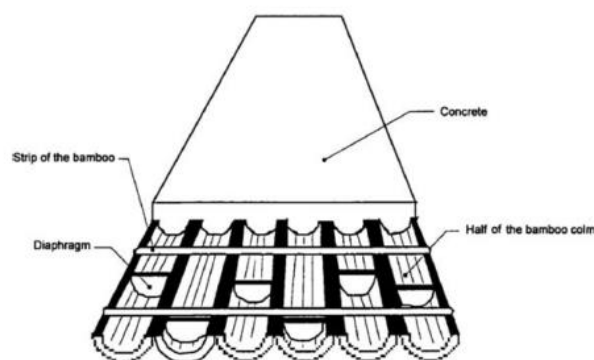


Figura 5 – Laje reforçada com bambu - (Ghavami, K., 2005)

Neste estudo aprofunda-se especialmente o funcionamento de estruturas constituídas apenas por canas de bambu. Esta é a maneira mais simples e comum da sua utilização, carecendo de especial atenção as ligações e a sua durabilidade.

Na China o bambu tem sido tradicionalmente usado para variados tipos de construções, mas principalmente para casas. Em Hong Kong tem sido e continua a ser o material mais usado para andaimes (Figura 6) e estruturas auxiliares às construções, como plataformas (Chung, K. [et al.], 2002). De acordo com Tong YC (cit. Yu, W.K. [et al.], 2005), acredita-se que na China o primeiro andaime feito de bambu foi feito há cerca de 5000 anos, enquanto os métodos de instalação e montagem foram estabelecidos há cerca de dois mil anos. Segundo Mathews (cit. Minke, G., 2012), os andaimes podem chegar facilmente aos 40 andares.



Figura 6 – Andaime em Hong Kong - (Chung, K. [et al.], 2002)

Muitos arquitetos e engenheiros, não só na China mas também na América do Sul, têm explorado a leveza do bambu para a concepção de pontes pedonais de pequeno vão (Figura 7 a Figura 10). Neste tipo de estruturas as treliças têm-se mostrado muito adequadas devido à alta resistência do bambu, onde os esforços são maioritariamente axiais (Janssen, J.J.A., 1981).

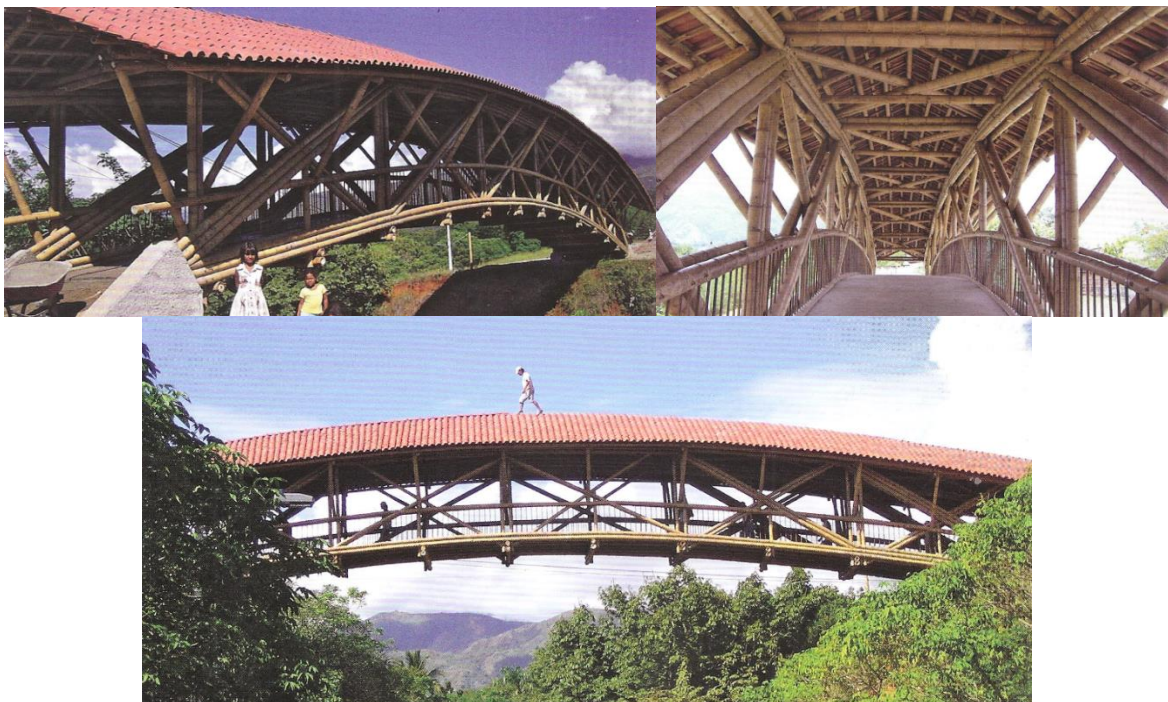


Figura 7 – Ponte pedonal de Jorg Stamm - (Minke, G., 2012)



Figura 8 – Ponte de Jorg Stamm e Xavier Pinto - (Minke, G., 2012)

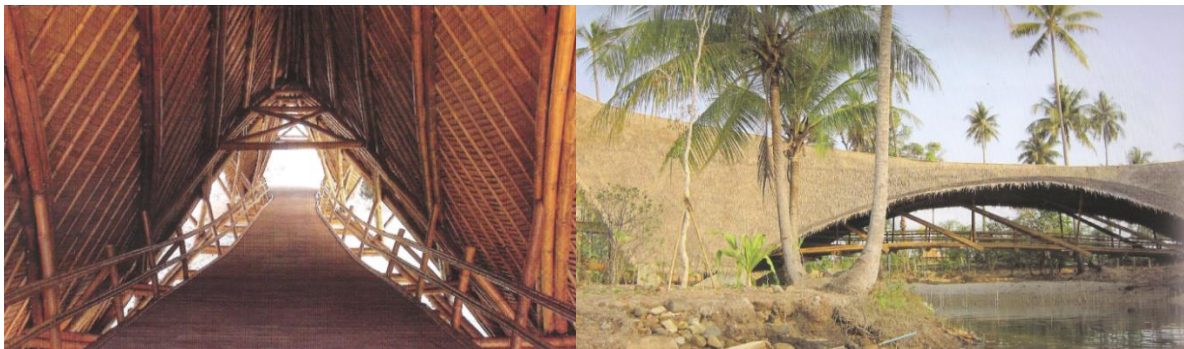


Figura 9 – Ponte pedonal de Jorg Stamm- (cit. Vidiella, À.S., 2011)

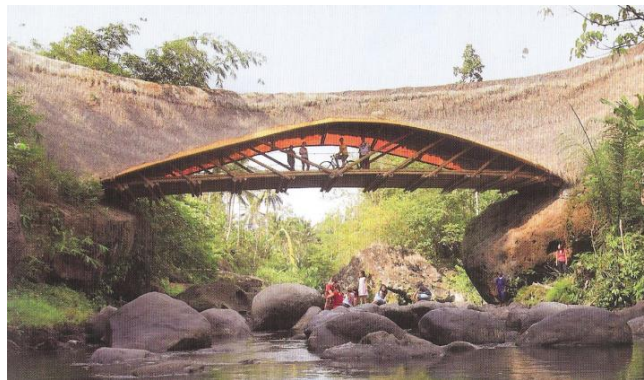


Figura 10 – Ponte de John and Chynthia Hardy - (Vidiella, À.S., 2011)

Como se pode ver nas figuras seguintes, tem-se dado bastante uso ao bambu para vencer grandes vãos em coberturas.

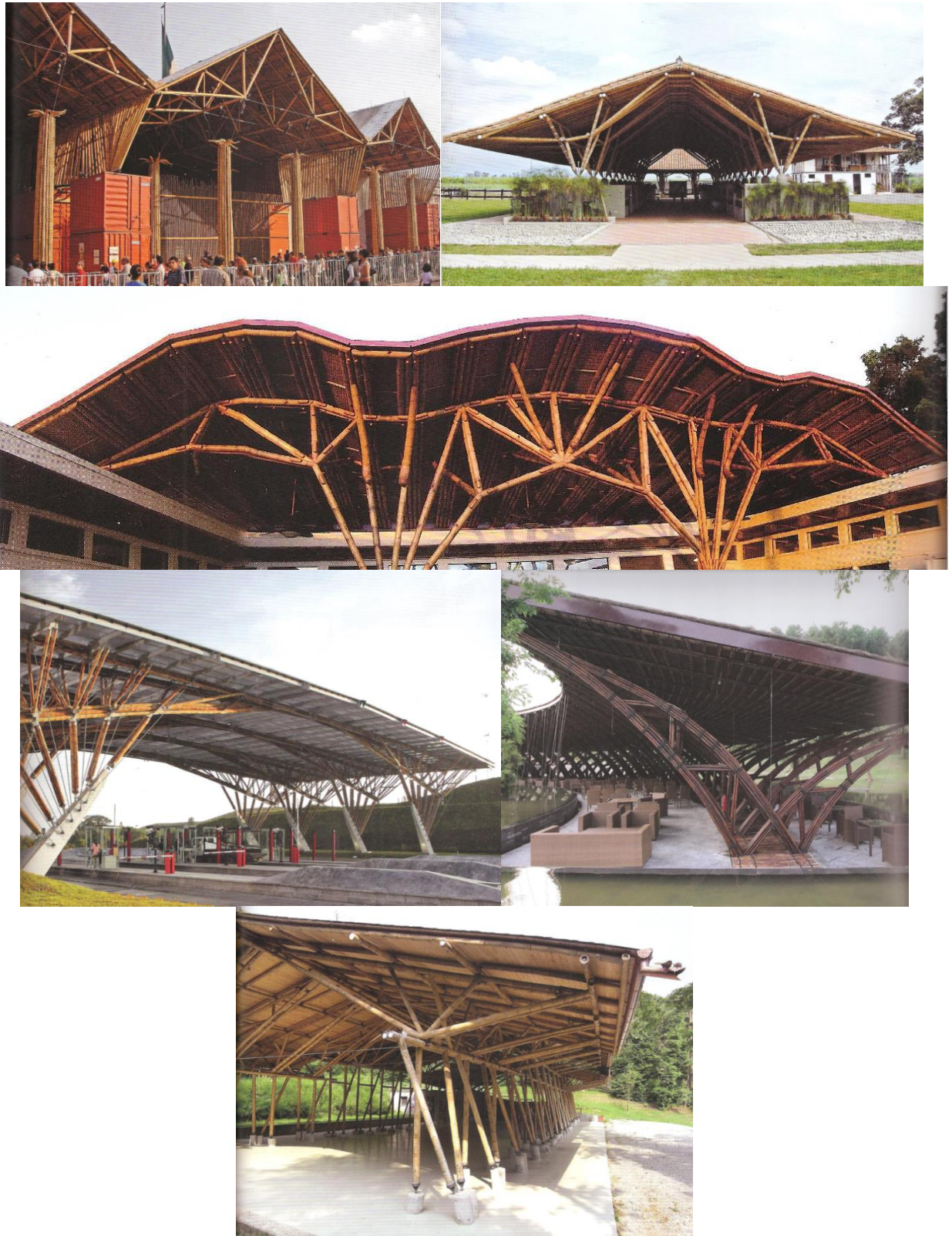


Figura 11 – Coberturas de grande vão - (Vidiella, À.S., 2011) e (Minke, G., 2012)

Apresentam-se agora outros bons exemplos da utilização do bambu como material estrutural na construção, do conhecido arquiteto Simón Vélez.

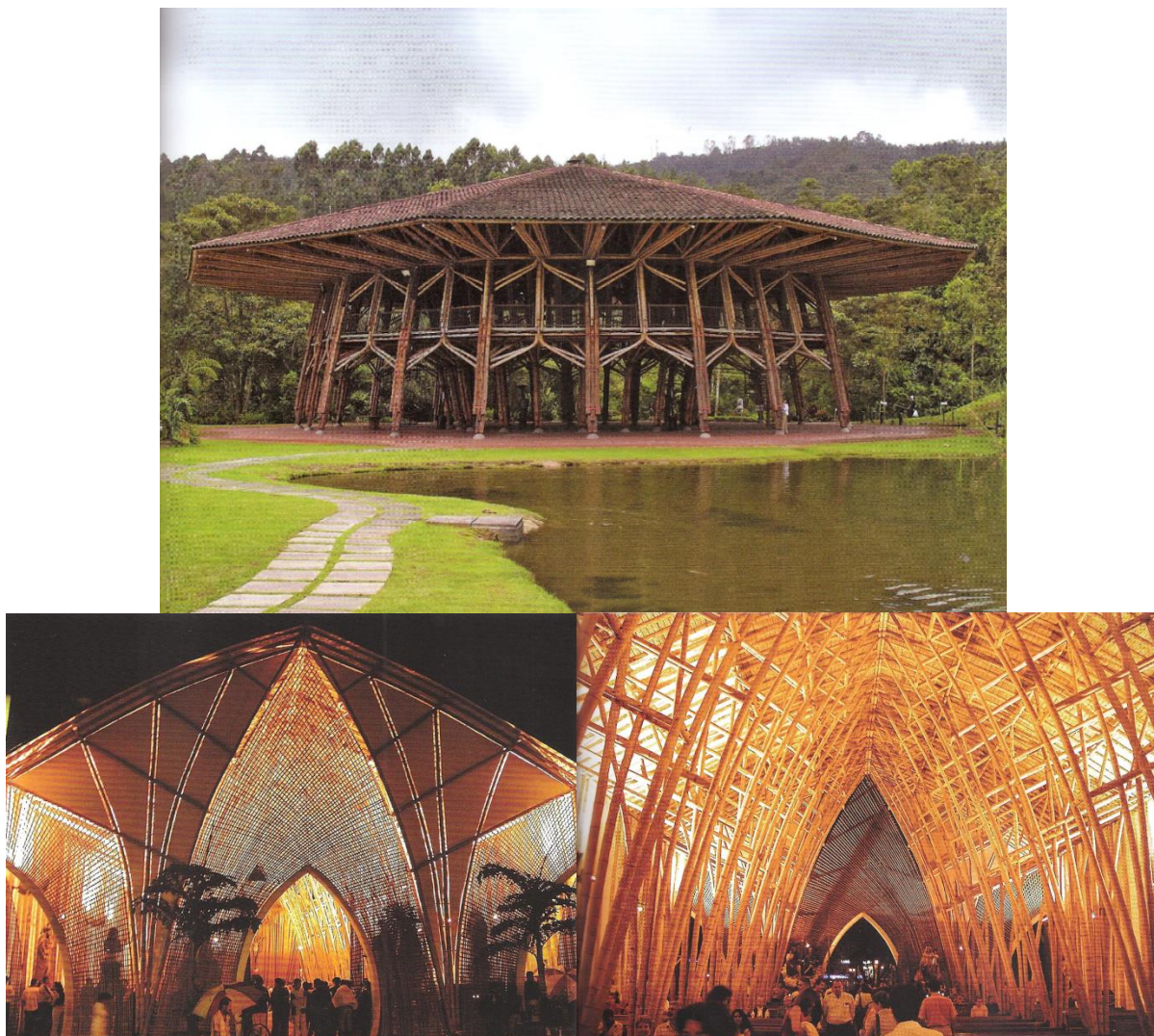


Figura 12 – Pavilhão (em cima) e igreja (em baixo) de Simón Vélez (ARIAS, J. [et al.], 2011)

Em visita ao Bambuparque, concluiu-se que, das espécies existentes no local, a espécie mais adequada para ser utilizada em estruturas da construção civil é a *Phyllostachys pubescens*, pelo que será dado mais ênfase a essa espécie.

2.1 ANATOMIA, COLHEITA E TRATAMENTO

2.1.1 ANATOMIA

As propriedades mecânicas do bambu estão fortemente relacionadas com a sua anatomia. Importa por isso descrever brevemente a anatomia do bambu para melhor compreender as suas características físicas e mecânicas. As propriedades do caule (cana) são determinados pela sua estrutura anatómica,

ou seja, a sua composição é determinada pela forma, orientação, tamanho e número de feixes vasculares. O caule é tipicamente um cilindro oco, que tende a afunilar da base para o topo, embora até quase $\frac{3}{4}$ da altura o diâmetro não tenha uma grande variação. É constituído por uma série alternada de nós e entrenós.

Nos entrenós as células são orientadas axialmente (verticais na planta) não existindo qualquer tipo de células radiais. A sua camada exterior é chamada de córtex e consiste em células cobertas por uma camada cutinizada (encerada), essencialmente constituída por sílica, enquanto o interior é constituído por células de parênquima (50%), vasos condutores (10%) e fibras (40%) (Liese, W., 1985). “A estrutura dos bambus pode ser encarada como sendo um material compósito constituído, a grosso modo, de fibras longas alinhadas de celulose imersas em uma matriz de lignina (parênquima)” (cit. Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005). Os vasos têm a função de transportar os nutrientes da raiz para o resto da planta. Como as paredes do bambu são muito finas, os vasos são reforçados por um tecido chamado de esclerênquima, que lhes confere resistência (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005). Um detalhe dos conjuntos vasculares pode-se ver na Figura 13, retirada do trabalho dos mesmos autores. A densidade das fibras aumenta significativamente desde o interior da parede para o exterior, mostrando ser um material muito eficiente do ponto de vista estrutural. Tal pode ser dito, uma vez que é altamente vantajoso que haja uma concentração de fibras, e conseqüentemente o aumento de peso (densidade), onde é mais necessário. A sua inércia de massa é muito maior do que seria se tivesse uma distribuição homogênea. Pode-se observar na Figura 14 e Figura 15, retiradas dos trabalhos de Liese, W. (1985) e de Janssen, J.J.A. (1981) respetivamente, essa distribuição e os veios, fibras, e outras partes do tecido que ficam mais densos e também ficam mais pequenos. A explicação do significado das várias componentes pode ser encontrada na obra do último autor indicado.

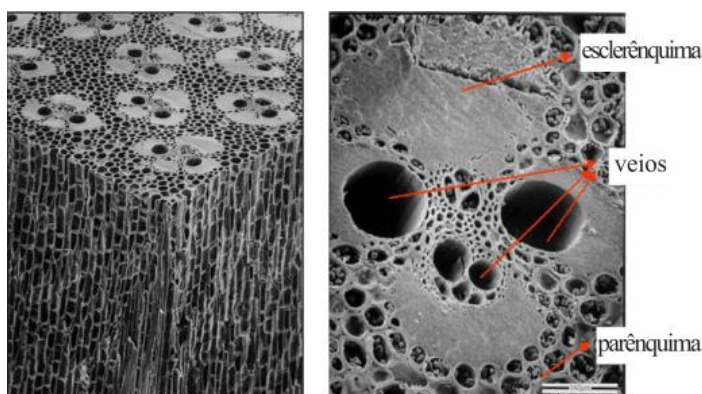


Figura 13 – Detalhe do conjunto vascular por Liese (1980) – (cit. Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)

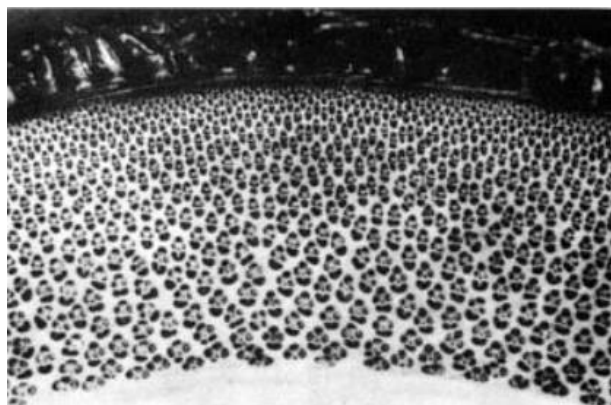


Figura 14 - (Liese, W., 1985)

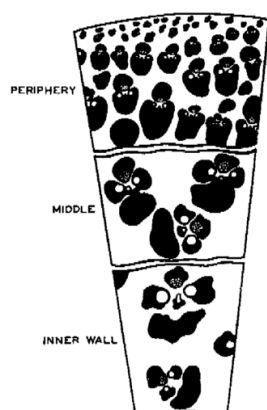


Figura 15 - (Janssen, J.J.A., 1981)

Macroscopicamente as propriedades mecânicas são determinadas através da massa específica e este valor depende maioritariamente do conteúdo em fibras, do diâmetro das fibras e da espessura das paredes. Chun (cit. Berndsen, R.S., 2008), em 2003, estudou a variação da espessura das paredes das células dos feixes vasculares para diferentes idades da espécie *Phyllostachys pubescens* (Ver Figura 16). Observa-se que com o aumento da idade há um grande aumento da parede celular e uma diminuição do diâmetro dos veios, resultando no aumento da densidade e consequentemente melhoramento das propriedades mecânicas.

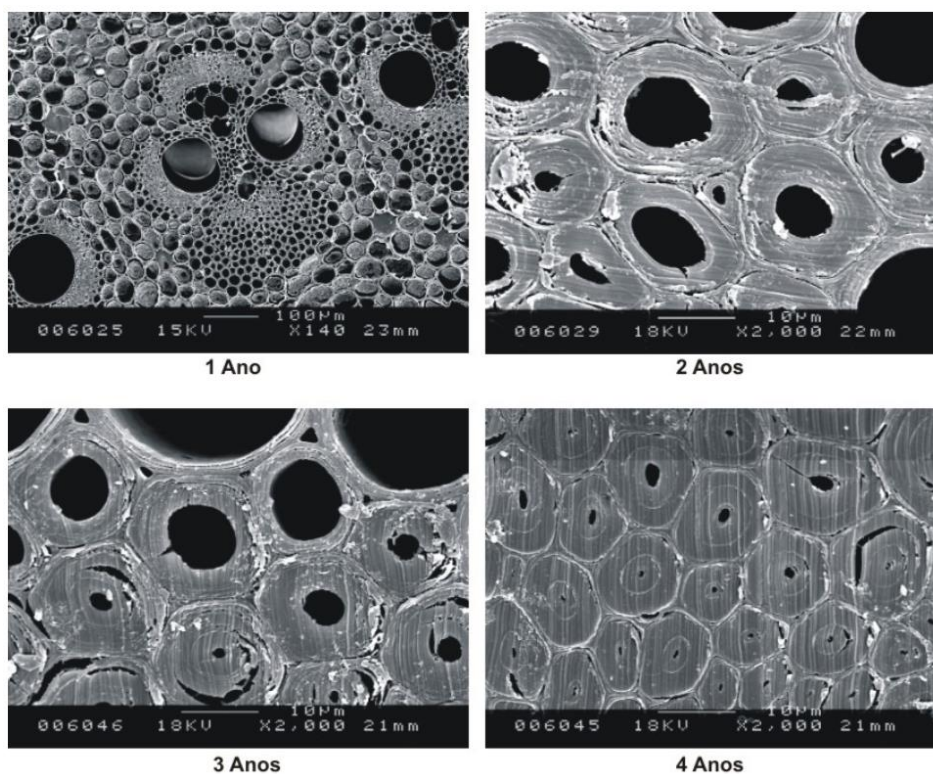


Figura 16 – Variação dos veios e da espessura da parede celular por Chun (2003) –(cit. Berndsen, R.S., 2008)

Na Figura 16 para a amostra com um ano de idade pode-se observar um feixe fibrovascular aumentado de 140 vezes. Para as restantes idades, a imagem está aumentada de 2000 vezes.

O diâmetro dos vasos varia não só com a idade como também com a posição em altura (base, meio ou topo), e também com a posição na parede (interior, do meio ou exterior).

No estudo de Berndsen, R.S. (2008) são citados vários trabalhos que recolheram informação sobre as fibras do bambu. Estas são caracterizadas por serem delgadas tendo um comprimento que pode variar entre 1,04 e 2,64 mm - muito superiores aos das madeiras - e uma têm largura entre os 10 e 24 μm . Segundo Moreno et al. (cit. OSORIO SARAZ, J.A. [et al.], 2009) a sua densidade média é de 1,38 g/cm^3 que de acordo com Liese (cit. OSORIO SARAZ, J.A. [et al.], 2009) representa cerca de 60-70% do peso total da cana.

A espessura das paredes da cana, e a distância entre nós é muito variável de espécie para espécie, e dentro da mesma espécie também, embora a dispersão não seja tão grande. A sua secção não é totalmente circunferencial e depende sobretudo dos esforços que esteve sujeito durante a sua vida, posicionando mais fibras nos sítios onde foi necessário (Nogata, F. and Takahashi, H., 1995). Hoje tem-se a noção de que devido às diferenças geométricas de cana para cana, que as ligações têm de ser quase personalizadas, para que se adaptem o melhor possível às reais dimensões das canas que vão ligar. Nos nós, as células estão alinhadas na direção perpendicular ao eixo longitudinal e proporcionam ligações transversais entre células, onde existe uma grande quantidade de veios. Os nós, são sólidos e possuem uns diafragmas que interligam todas as partes do caule, constituindo-se portanto nos locais ideais para a execução das ligações entre peças – zonas de maior corte.

O bambu que cresça em terrenos inclinados com pouca água é mais forte do que se crescer num terreno plano ou em zonas de grande humidade. O teor em humidade deste último será sempre muito superior ao primeiro e terá por isso uma densidade inferior (Minke, G., 2012).

2.1.2 COLHEITA E TRATAMENTO

Para a adequada utilização do bambu na construção e em especial em elementos estruturais haverá que ter muito cuidado com a colheita e com o tratamento dado ao bambu. Estes são aspetos fundamentais para se assegurar uma boa durabilidade dos elementos construtivos e uma boa performance do material, garantindo a sua proteção do ataque de insetos, fungos, etc., e evitando-se uma precoce degradação do material.

2.1.2.1 Colheita

Segundo Department of Science and Technology, G.o.I. (2006), a colheita do bambu deve ser feita durante os meses frios e secos, sendo muito importante que seja no inverno. No caso do hemisfério norte deve ser feito no mês de Janeiro ou Fevereiro que são os meses mais frios. Neste período a planta está adormecida, e a conservar os nutrientes para os rebentos que brotam na próxima primavera. Desta maneira, o conteúdo de amido, principal alimento de insetos, é mais baixo, fazendo com que o ataque dos insetos seja menos provável. De preferência deve ser colhido numa altura seca para que contenha o mínimo de teor em humidade possível, o que acontece nos trópicos – onde os períodos mais frios são os mais secos -, mas já não acontece nos climas temperados onde os períodos frios são os mais húmidos, sendo que neste caso se dá preferência à temperatura ambiente, que deve ser o mais baixa possível.

A humidade é condicionante, uma vez que no processo de secagem a variação de volume é proporcional à humidade. Os bambus com idade inferior a 3 anos são considerados verdes, com um teor em humidade e quantidade de amido bastante elevado, não estando ainda aptos para se tornarem eficientes e adequados à sua utilização como elementos estruturais. Fala-se também que as fases da lua possam afetar o teor em humidade e amido e consequentemente o aumento da durabilidade. Vários estudos foram feitos sobre este assunto, mas existe uma opinião bastante divergente entre diversos autores.

O tratamento deverá iniciar-se logo que possível depois do corte, evitando-se que o início da reação de bloqueio dos veios de condução do caule limite a introdução dum líquido conservante. Na maior parte dos casos, não sendo possível iniciar imediatamente o tratamento, terá de se cortar as extremidades quando se tratar (Department of Science and Technology, G.o.I., 2006). “Quanto maior for o tempo decorrido entre o corte do colmo e o início do seu tratamento maior também será o grau de dificuldade para a penetração da solução preservativa através dos vasos” (Espelho, J.C.C. and Beraldo, A.L., 2008).

Depois da colheita, as canas terão de ser cuidadosamente manipuladas, para evitar que estejam em contacto direto com o solo, garantir que o espaço onde são colocadas é bem ventilado, e remover as canas que estiverem infetadas ou a degradar-se (Department of Science and Technology, G.o.I., 2006). Idealmente devem estar numa zona coberta, mas muitas vezes isso não é possível. Em áreas cobertas é preferível que as canas estejam na vertical em vez de na horizontal uma vez que demoram cerca de metade do tempo para secarem (Liese, W., 1985). Quando são secas na horizontal deverão elevar-se as canas do solo, tendo um cuidado especial de apoiar convenientemente as canas inferiores para que não encurvem. O tempo de secagem ou cura depende das condições em que as canas são colocadas, da temperatura e da humidade do local, sendo que o processo está terminado quando o teor em humidade está em equilíbrio com o ambiente envolvente.

2.1.2.2 Tratamento

A durabilidade do bambu ao natural é bastante reduzida e o remédio é o seu tratamento (Janssen, J.J., 2000). O mesmo autor diz que, em geral, se o bambu não for tratado pode durar de 1-3 anos caso esteja em contacto com o solo e descoberto, 4-6 anos se coberto sem tocar no chão, e 10-15 anos se estiver em condições muito favoráveis. Sendo assim, quando se pensa na sua utilização como material para a construção (e especialmente como material estrutural) é indispensável a adoção de um bom tratamento que garanta o aumento considerável destes períodos de tempo.

O tratamento pode dividir-se em dois tipos, tradicional ou químico. A escolha do método de tratamento depende de vários fatores, como o fim para que é usado, se está verde ou seco, qual a quantidade de canas a tratar, etc.

Por tudo isto, ao projetista exige-se que para além dos cuidados com o dimensionamento tenha em devida conta a proteção à chuva, humidades permanentes (como por exemplo salpicos de água da chuva nas fundações), raios solares, etc. Isto porque não há químico que seja bom suficiente para resolver uma solução incorreta de projeto (Janssen, J.J., 2000).

Os métodos tradicionais, usados há já milhares de anos, são simples e não carecem de grande equipamento. Métodos como a lixiviação, fumar as canas, a lavagem com cal, a cosedura em forno aberto e a utilização de corantes, vernizes e tintas naturais são alguns destes métodos tradicionais.

Hoje, o tratamento mais adequado para que se garanta que o bambu tenha uma duração mais longa é o tratamento com químicos. Devido à sua camada externa ser “encerada” a entrada dos produtos por aí é muito difícil, pelo que se faz a sua introdução pelas extremidades. Alguns dos tratamentos existentes são os “Butt treatment”, método Boucherie, método Boucherie modificado, método do tanque aberto para imersão a frio, tratamento à pressão e processo banho quente e frio, entre outros.

A descrição destes métodos não faz parte do âmbito do presente trabalho, pelo que poderá encontrar-se uma descrição mais detalhada destes métodos no trabalho de Jayanetti, D.L. and Follett, P.R. (1998).

É de reparar que os estudos feitos para evitar os ataques de fungos e insetos foram feitos para países com climas tropicais. Em climas temperados, como Portugal, este ataque é muito menos severo. Para além disso, nos climas temperados a degradação do material também não é tão grave porque a humidade relativa do ar é significativamente menor. De qualquer maneira estes procedimentos não devem ser desprezados quando se está a tratar o bambu que se usa em Portugal. Nos países temperados, adotando o mesmo tipo de tratamento que nos trópicos, assegura-se uma maior durabilidade o que é extremamente importante em termos de confiança estrutural.

3

PROPRIEDADES MECÂNICAS

No seu habitat natural, o bambu funciona como uma consola que está encastrada no solo e está sujeita às cargas do seu peso próprio e do vento. Por isso, naturalmente é uma estrutura otimizada para resistir a momentos flettores. (Tan, T. [et al.], 2011)

Para determinar as propriedades mecânicas do bambu, como qualquer outro material, é necessário recorrer a ensaios. Dos ensaios pode-se chegar a valores médios, prováveis e característicos, correlacionando os resultados, e tratando-os estatisticamente através de, por exemplo, regressões lineares, quadráticas, etc.. Nos dias de hoje, com a evolução do cálculo automático há uma grande facilidade no tratamento dos dados, mas há uns anos atrás, quando o cálculo ainda era bastante complexo, o trabalho estatístico tinha de ser feito à mão e tinha também de ser demonstrado, à mão. Por isso, não é invulgar que os estudos que incluíam ensaios tivessem necessidade de apresentar o modelo matemático que lhe estava associado.

Abordando o contexto histórico do que foi investigado acerca das propriedades mecânicas do bambu, para que se perceba a evolução neste campo, apresenta-se os trabalhos feitos por Arce-Villalobos, O.A. (1993) e Janssen, J.J.A. (1981), que para além de terem realizado ensaios, completaram as suas conclusões com os resultados de todos os ensaios levantados por eles e que tinham sido feitos até então. Esse trabalho é depois completado com informação retirada de estudos mais recentes.

Muita da investigação anterior a estas datas lidava muito com os aspetos biológicos. No seu trabalho, Arce-Villalobos, O.A. (1993) dedica-se apenas ao cálculo das capacidades de tração e de compressão, enquanto Janssen, J.J.A. (1981) determina, para além dessas capacidades, o modo como as peças de bambu reagem quando sujeitas à flexão, ao corte, qual o coeficiente de Poisson, e a densidade, fazendo para estes, também um breve apanhado histórico. Para determinar as várias propriedades os investigadores tiveram de ser criativos para que se pudesse ensaiar este material que tem uma geometria difícil. Na realização dos ensaios à flexão o mais comum é usar uma carga pontual a meio vão (tipo I), ou duas cargas pontuais ficando o vão dividido em 3 partes iguais (tipo II). Este segundo tem a vantagem que na parte central o elemento está sujeito à flexão pura, com esforço transversal nulo. Desta maneira sabe-se que garantidamente a rotura se dá por flexão, e obtém-se assim uma maior precisão na definição das respetivas características. Nestes ensaios, pode-se utilizar a secção toda da cana, ou apenas tiras. No caso de utilização do bambu em estruturas com secções inteiras, interessam os ensaios realizados com toda a secção, pois em ensaios à flexão, interessa perceber como a secção “trabalha”. De qualquer maneira é feita referência aos diferentes tipos de ensaios e geometrias.

Nos parágrafos seguintes é feito o apanhado histórico referindo-se os valores obtidos pelos autores citados por Janssen e Arce-Villalobos, em que a informação é organizada de acordo com cada característica a estudar.

Para esforços de flexão apenas Janssen, J.J.A. (1981) recolhe informação de ensaios realizados por diferentes autores, sendo essa informação apresentada nos seguintes parágrafos.

Em 1922, Meyer e Ekelund realizaram, em espécie não especificada, ensaios à flexão com a seção total da cana com vãos diferentes e para os dois tipos de ensaios descritos acima. Para o tipo I utilizou vãos de 1800 e 2100 mm e para o tipo II um vão de 2100 mm, tendo obtido tensões de rotura respetivamente de 90, 88 e 96 MPa.

Em 1925, Teodoro utilizou as espécies *Bambusa spinosa* e *Bambusa vulgaris* com a seção total da cana para o ensaio tipo I, com vão de 3000 mm para o qual obteve o resultado, para a tensão de rotura, de 55 e 33 MPa respetivamente, e para o módulo de elasticidade, de 10300 e 18400 MPa respetivamente.

Espinosa, em 1930, realizou ensaios com a espécie *Bambusa spinosa* das Filipinas para tiras de bambu, com um vão de 300 mm, para os quais obteve valores de 143 e 113 MPa para a tensão de rotura. O bambu utilizado estava seco e curado.

Ainda no mesmo ano, Trojani determina uma regra empírica para a resistência à flexão: $F = \frac{100 \cdot n}{3}$, onde “F” é a carga máxima em kgf, e “n” é o diâmetro exterior em “cm”, sendo válida para vãos de 3 metros.

Em 1950, Glenn realiza ensaios de tiras de bambu, obtendo valores da tensão de rotura perto de 145 MPa e para o módulo de elasticidade perto de 14500 MPa.

Limaye, para a espécie *Dendrocalamus strictus*, realizou ensaios à flexão do tipo I com 700 mm de vão com toda a secção para bambu verde e seco. Obteve resultados de tensão de rotura e de módulo de elasticidade, cujos valores foram para o primeiro caso de 68 MPa e 12000 MPa respetivamente, e para o segundo caso de 107 MPa e 15600 MPa respetivamente.

Entre 1961 e 1962 Sekhar et al. ensaiaram as espécies *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* à flexão do tipo I, com vãos de 700 mm e com a secção total da cana. Para a primeira espécie, os resultados para a tensão de rotura foram entre 56 e 100 MPa e para o módulo de elasticidade foram entre 8800 e 15400 MPa, variando muito com o teor em humidade da amostra. Para a segunda espécie, obteve valores entre 92 e 97 MPa para a tensão de rotura e entre 13700 e 16000 MPa para o módulo de elasticidade. Para esta última espécie, o teor em humidade foi de 12 % para todas as amostras. Destes resultados entende-se que para um teor em humidade estabilizado baixo, isto é perto de 12%, obtêm-se resultados com bastante menor dispersão e com valores superiores aos que se teria se o teor em humidade fosse mais elevado.

Atrops, em 1969, realizou ensaios com seção total da cana e com um vão de 3600 mm para o qual obteve 107 MPa de tensão de rotura. Utilizou tiras, para um vão mais pequeno, de 300 mm, e chegou a valores de 113 e 142 MPa para a tensão de rotura.

Passando agora aos esforços de compressão, cita-se informação dos 2 trabalhos ((Janssen, J.J.A., 1981) e (Arce-Villalobos, O.A., 1993)).

Em 1923, Meyer e Ekelund (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993) apresentam ensaios à compressão com amostras de bambu de altura e diâmetro similares. A resistência máxima registada foi de 39,27 MPa e o tipo de rotura foi descrito por fendas verticais que abriram cada vez mais à medida que a carga

aumentava. Não é referida a espécie botânica ensaiada nem se as amostras se apresentavam em tiras ou em cana.

Espinosa (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993) em 1930 fez ensaios à compressão com a espécie *Bambusa spinosa* das Filipinas com amostras de 1,20 e 0,35 metros de altura. Os resultados variaram entre 27 e 32 MPa para as amostras de dimensão maior e entre 51,8 e 82,9 MPa para as outras.

Entre 1950 e 1954, Ota (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993) pela primeira vez relaciona as características mecânicas com propriedades físicas ou biológicas. Ota fez um estudo onde apresenta valores, para diferentes densidades e teores em humidade, com a resistência à tração e compressão de bambus das espécies *Phyllostachys pubescens* e *Phyllostachys reticulata* de diferentes localidades. Para os ensaios à tração não foi descrito qual foi o procedimento, mas para a compressão tirou amostras da parte exterior, média e interior da parede de uma amostra, com uma forma aproximada a um pequeno cubo. A humidade relativa destas estava entre 10 e 14 %. Para as espécies em causa conseguiu uma correlação entre os resultados obtidos para a resistência média à compressão, que foram de 81,6 e 83,1 MPa respetivamente, e as densidades de 965 e 866 kg/m³. Refere também que a resistência decresce com a proximidade de um nó.

Limaye, em 1952, (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993) escreve dizendo que fatores, nomeadamente teor em humidade, presença de nós na amostra, posição da amostra no caule e idade estão relacionados com as propriedades mecânicas. É dito que o Módulo de Young é tanto maior quanto maior for a espessura da parede, sendo que tem o seu valor máximo na base e mínimo no topo. A espécie estudada foi a *Dendrocalamus strictus*, e foi concluído que a cura ou secagem do bambu faz com que haja um aumento de resistência em cerca de 40% relativamente às amostras verdes. É dito que existe um acréscimo das características com o envelhecimento pelo menos até aos três anos, que foi a idade máxima estudada. O mesmo autor (cit. Janssen, J.J.A., 1981) obteve valores para a resistência à compressão que variaram entre 40 e 74 MPa.

Em 1956, através de Sekhar e Rawat (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993), é feita a primeira tentativa para estabelecer um ensaio padrão para a compressão de amostras de bambu, recorrendo a trabalhos realizados no âmbito das especificações da madeira.

Entre 1961 e 1962 Sekhar et al. (cit. Janssen, J.J.A., 1981) realizaram ensaios à compressão para amostras de *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus strictus* com 3 anos de idade. Para a primeira espécie os autores obtiveram 46 MPa e para a segunda espécie obtiveram 54 MPa.

Atrops (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993), em 1969, fez também um estudo do bambu à compressão, no qual totalizou 108 ensaios. Para melhor entender a influência dos nós nos resultados utilizou amostras que não possuíam nós, amostras com nós nas extremidades e amostras com nós no centro da mesma. O teor em humidade já era considerado um fator que influenciava os resultados, sendo importante saber qual era o seu valor. Neste caso a média foi de 18,1%. Para as primeiras amostras os resultados variaram entre 522 e 402 MPa, as segundas amostras entre 537 e 407 MPa e as terceiras entre 528 e 433 MPa, sendo que estes resultados obtidos pelo autor são demasiado altos.

Arce-Villalobos, O.A. (1993) cita diversos autores que realizaram ensaios à tração, sendo que essa informação é descrita nos seguintes parágrafos.

Meyer realiza ensaios em vigas de betão reforçadas com bambu. Não é explicitado nem a espécie botânica utilizada nem se foi utilizada em ripas, faixas retiradas da cana, ou mesmo em cana. Através

de fórmulas parecidas com as utilizadas no cálculo do betão armado com aço, determinou uma tensão máxima de tração 100 MPa.

Em 1941, Duff utilizou bambus da espécie *Phyllostachys pubescens* em ensaios à tração. Desta vez, utilizou tiras de canas e reforçou as extremidades para evitar danos provocados pelas garras da máquina. Este reforço foi feito através da colagem de material extra, mas a sua geometria exata não é conhecida. Os ensaios foram feitos na camada interior (tendo obtido a tração mínima de 54 MPa), e na camada exterior, com um resultado máximo de 342 MPa. O mesmo autor refere ainda que, nos testes que realizou, descobriu que o módulo de elasticidade tem uma variação consistente, e que a capacidade resistente não varia muito da base até perto de meia altura do caule, e que cresce até ao topo onde é de 30-40% superior. Afirma que os nós são os pontos de menor resistência, podendo ter apenas 80% da capacidade resistente dos entrenós.

Karachandani, em 1959, estudou a adequação do bambu como material de construção, cujos resultados para a espécie *Dendrocalamus strictus*, à tração, foram de 100 a 335 MPa para camada exterior e 150 a 160 MPa para a camada interior.

Um estudo mais abrangente nesta matéria, feito por Cox em 1969, relata que a resistência do bambu depende da idade, variedade fisiológica dos caules e do habitat, entre outros fatores. Acrescenta que a resistência à tração em cada caule cresce desde o primeiro nó até ao nó central e a partir desse decresce até ao topo. As amostras mais resistentes mostraram-se ser as dos entrenós com maior comprimento. É dito que a idade para a qual se atinge o pico da resistência à tração é entre os 3 e 4 anos. O autor utilizou a secção inteira dos caules, utilizando garras especiais para evitar o esmagamento localizado nos extremos, tendo atingido valores médios de 110 MPa para a tração e de 18670 MPa para o módulo de elasticidade.

A dimensão dos provetes utilizados para os ensaios à compressão pode assumir diferentes variantes, como a altura em função do diâmetro, o número de nós, embora não possa variar muito mais. O mais normal é a utilização de amostras cortadas diretamente da cana, tendo-se obtido resultados bastante bons utilizando as secções inteiras. Para o caso dos ensaios à tração o cenário não é o mesmo. O investigador tem de chegar a uma solução criativa que permita garantir uma aderência entre a máquina e a amostra de tal forma que a consiga tracionar sem que a danifique. Como se pode imaginar existem inúmeras maneiras de o fazer, algumas mais eficazes e precisas que outras. Atrops, em 1969, propôs uma geometria para as amostras tendo o cuidado de reforçar as partes extremas, análoga à proposta de Duff. A sua forma detalhada pode-se ver na Figura 17. Ao contrário dos ensaios à compressão, que usam um troço inteiro da cana, os ensaios à tração com a geometria proposta por Atrops utilizam tiras retiradas do caule. Como está explicado na Figura 17, são utilizados suportes de madeira que agarram as tiras de bambu nas zonas onde há variação da secção. Há autores que dividem a parede do caule em camadas exterior, media e interior e outros que utilizam toda a espessura da parede, sendo esta última a que realmente interessa para a utilização de bambu nas estruturas.

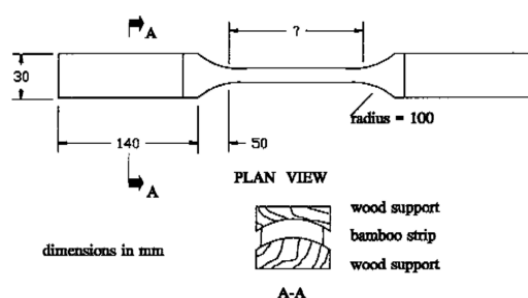


Figura 17 – Amostra por Atrops 1969 – (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993)

Atrops não especificou quais foram as espécies utilizadas e dividiu as amostras em camada exterior e interior da parede. Os resultados para as diferentes camadas foram de 290 MPa e 153 MPa respectivamente.

Em 1985, Xiu-Xin aperfeiçoa a amostra proposta por Atrops modificando as dimensões – ver Figura 18.

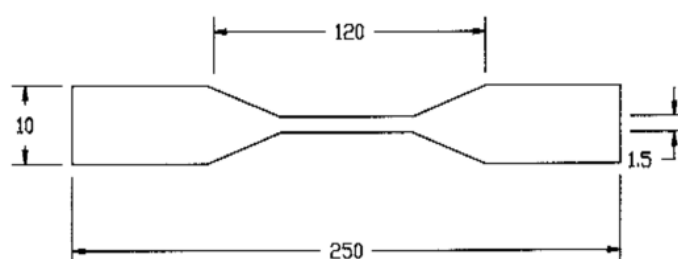


Figura 18 – Amostra por Xiu-Xin – dimensões em mm - (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993)

Soeprayitino et al., em 1988, fizeram uma comparação das resistências à tração entre bambus da espécie *Gigantochloa pseudoarundinacea* para diferentes locais de origem. Na Tabela 1 tem um resumo da informação recolhida pelo autor.

Tabela 1 - Resultados por Soeprayitino –(cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993)

Soeprayitino 1988 cit. Arce-Villalobos (1993)	Resistência (MPa)	Módulo E. (MPa)	Densidade [ρ] (kg/m3)		
			Nó	Entrenó	
Origem	Encosta da colina	177,9	27631	770	609
	Fundo do Vale	149,4	19643	693	565

Prawirohatmodjo, em 1988, obteve para as resistências médias à tração de diferentes espécies valores entre 297 MPa e 315 MPa para bambus verdes e secos respectivamente. O mesmo autor realizou ensaios à compressão e relata que, na sua investigação, os nós nas amostras parecem não alterar o resultado da resistência, ao contrário do que vários autores já diziam.

Sharma, em 1990, investigou a possibilidade de se utilizar o bambu como reforço em vigas de betão. Para a espécie *Bambusa vulgaris* chegou aos valores de 145 MPa para amostras com nós e 200 MPa para amostras sem nós.

Por último, apenas por Janssen, J.J.A. (1981) cita autores que tenham realizado ensaios ao corte, pelo que a informação relativa a esses ensaios é descrita nos seguintes parágrafos.

Meyer em conjunto com Ekelund conclui que o bambu é comparável com a madeira à flexão e à tração, enquanto ao corte o bambu tem uma resistência bastante inferior. E isto porque avaliaram essa resistência em cerca de 8% da resistência à compressão, ou seja em termos absolutos os mesmos determinaram que a resistência ao corte se situa entre 7,1 e 8,1 MPa.

Ota realizou ensaios ao corte, obtendo valores entre 10,5 e 14,9 MPa para as espécies *Phyllostachys pubescens* e *reticulata*.

Sekhar et al. também fizeram ensaios ao corte e obtiveram valores entre 6,7 e 9,8 MPa, tendo obtido o valor máximo para canas com 4 anos de idade da espécie *Bambusa nutens* e *Dendrocalamus strictus*.

Atrops determina a resistência ao corte obtendo os valores de 19,8 e 16,7 MPa.

Outros aspetos relativos às propriedades mecânicas foram abordados, como o cálculo do coeficiente de Poisson feito por Cox (cit. Janssen, J.J.A., 1981) através do rácio entre o alongamento axial e a contração transversal em ensaios à tração, obtendo uma média de 0,317.

Por outro lado, McLaughlin, em 1979, (cit. Arce-Villalobos, O.A., 1993), numa tentativa de simplificar a avaliação das características mecânicas, refere que as propriedades mecânicas de materiais compostos por celulose se correlacionam muito bem com a densidade, e provou que para o bambu é uma boa abordagem a fazer.

Depois do apanhado histórico referido nos trabalhos de Janssen e Arce-Villalobos o capítulo das propriedades mecânicas é complementado com a recolha de informação de trabalhos realizados nesta área consultados pelo autor desta tese.

Em 1981 Janssen publicou a sua tese de doutoramento (Janssen, J.J.A., 1981), onde explica que o interesse pelo bambu foi despertado quando voluntários em países de terceiro mundo pediram aconselhamento técnico para construir treliças em bambu para coberturas em escolas e armazéns. Não sabendo como ajudá-los, começou a pesquisar e encontrou um documento do “KNIL”, (Exercito Real Holandês das Índias Orientais), quando a Indonésia era uma colônia Holandesa, datado de 1890. Não é especificado qual a informação que esse documento contém, mas refere que o seu conteúdo foi muito útil para muitos voluntários. Janssen publicou uma cópia em 1979 em Holandês, e um ano depois em Inglês. Provavelmente fala de métodos construtivos, e não tanto das propriedades mecânicas. Desde essa altura, este autor tem sido um grande entusiasta do bambu, escrevendo uma série de livros e artigos até à presente data. Esteve também envolvido na publicação da primeira norma internacional. Na tese de doutoramento faz variados ensaios, à compressão, flexão, tração, e corte com diferentes variáveis para poder avaliar quais são as que mais influenciam os resultados. A espécie que foi utilizada foi a *Bambusa blumeana*. O autor diz que para os ensaios à compressão o modo de rotura dá-se pela separação das fibras ou esmagamento da amostra. Os resultados para este ensaio variaram dentro do intervalo de 60 a 110 MPa, e as variáveis que mais afetaram os resultados foram o teor em humidade, a posição da cana (topo, meio ou base), e a existência de nós. Faz também referência a que a densidade se pode relacionar com a resistência última: $f_c = 0,094 * \rho$, onde “ f_c ” é a resistência última à compressão e “ ρ ” é a densidade. A expressão é válida para amostras com 12% de teor em humidade.

Para os ensaios à flexão, o autor relata que o módulo de elasticidade se mantém constante até mesmo antes da rotura. O vão livre foi de 3600 mm e o carregamento foi do tipo I. Usou a mesma espécie referida acima e obteve, para ensaios de curta duração (velocidades de deformação grandes), valores de 84 MPa e 20500 MPa para a resistência última e módulo de elasticidade respetivamente. Para ensaios de longa duração (velocidade de deformação muito lenta) o comportamento é bastante distinto. A cada 24h é retirada a carga durante um curto intervalo de tempo. “Passados 20 dias a deformação total é de 165% da deformação imediata”, diz o autor. O valor obtido para estado limite último foi de 41 MPa, com 10 MPa de desvio padrão. Para a madeira os valores a longo prazo são cerca de 55% dos valores a curto prazo, sendo que para o bambu ($0,55 \times 84 = 46$ MPa) pode-se dizer o mesmo, uma vez que o valor não varia muito, contando com o desvio padrão. Janssen, J.J.A. (1981) descreve que a rotura por flexão do bambu dá-se pela perda de coesão entre as fibras, e não por atingir a capacidade resistente das mesmas.

Nas estruturas o corte está diretamente relacionado com esforços de flexão e com a ligação entre elementos. Até esta altura cada autor determinava as propriedades mecânicas do bambu conforme achasse que fosse a melhor maneira. Por isso, pode-se esperar que haja dispersão nos resultados. Para a compressão e flexão é mais ou menos intuitivo a maneira de submeter as amostras aos determinados esforços. Para o corte tal não acontece, havendo inúmeras maneiras de o fazer. A maioria exigia que se preparasse a amostra de tal maneira que era difícil de reproduzir. Janssen propõe uma nova forma de o fazer sem que seja precisa uma preparação das amostras, precisando apenas de cortar um troço reto da cana. Pode-se observar a proposta de Janssen na Figura 19. O valor médio obtido foi de 10,26 MPa. A sua resistência ao corte decresce ligeiramente da base para o topo da cana.

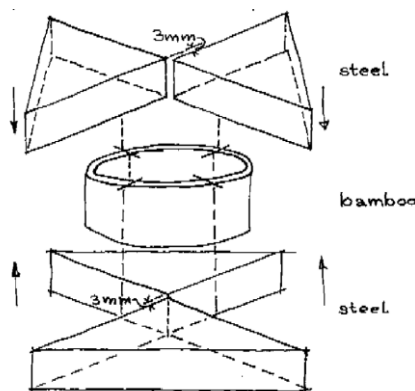


Figura 19 – Proposta para ensaio ao corte - (Janssen, J.J.A., 1981)

Caso se determine a resistência ao corte através de ensaios à flexão, os resultados são bastante inferiores. Isto pode ser explicado pelo facto de a amostra não estar sujeita apenas ao corte.

Para a tração o autor tentou seguir as prescrições de autores que já tinham realizado ensaios anteriormente, mas teve muitos problemas nas garras das amostras. Ou havia rotura por compressão transversal ou por corte longitudinal. A primeira é explicável sabendo que a resistência à tração está entre 200 e 300 MPa e o módulo de elasticidade de compressão transversal tem um valor muito baixo.

Para a determinação do coeficiente de Poisson, o autor realizou um ensaio apenas, devido ao trabalho associado à preparação da amostra - ver Figura 20. Os resultados foram de 0,51, 0,31 e 0,31 para a face exterior, ao longo da espessura da parede, e face interior respetivamente.

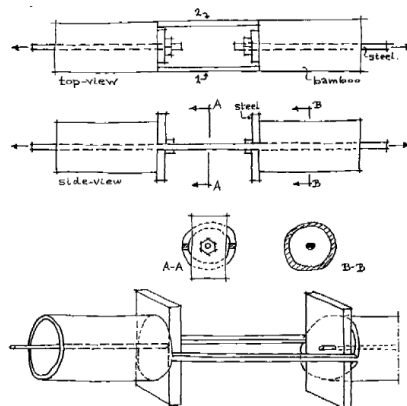


Figura 20 – Determinação do coeficiente Poisson - (Janssen, J.J.A., 1981)

Em 1993 Arce-Villalobos, O.A. (1993) faz a sua tese de doutoramento, e escreve sobre os aspetos fundamentais do dimensionamento de estruturas de bambu. Começa por determinar a resistência à tração tangencial, onde utiliza uma amostra com a configuração da Figura 21, e recorre à utilização de elementos finitos para acompanhar os ensaios. Foram ensaiadas duas espécies, *Guadua s.p.* e *Gigantochloa scortechini*, e os resultados médios para a resistência foram de 2,61 e 2,45 MPa respetivamente, e para o módulo de elasticidade os valores médios foram de 2122,8 e 2444,7 MPa respetivamente.

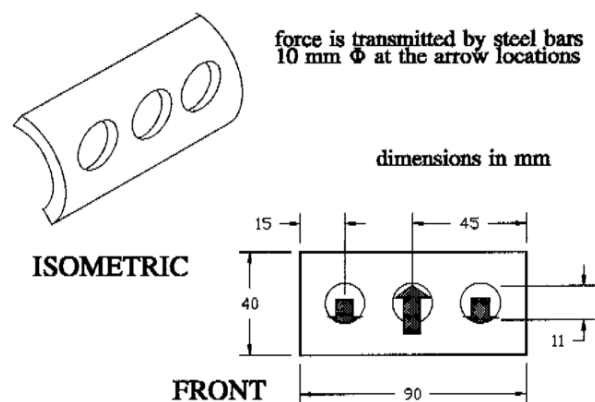


Figura 21 – Amostra para tração tangencial - (Arce-Villalobos, O.A., 1993)

Para a tração paralela às fibras de *Bambusa blumeana*, foram testadas amostras submetidas a diferentes velocidades de deformação. À medida que a velocidade aumentava, a resistência também aumentava. A média dos resultados à tração foi de 275,16 MPa. Conclui que a tração paralela às fibras (f_t) pode ser relacionada com a densidade (ρ), $f_t = 0,4 * \rho$.

O mesmo autor faz também ensaios à compressão e obteve para a espécie *Bambusa blumeana* um módulo de elasticidade de 18784,7 MPa e para a espécie *Guadua s.p.* obteve um módulo de elasticidade médio de 18464,6 MPa e uma resistência última média de 50,50 MPa. Foi utilizada a secção inteira, descrevendo quais são os modos de rotura que podem ocorrer, dependendo de como eram feitos os ensaios. “A compressão significa o encurtamento longitudinal e, consequentemente,

deformação lateral (chamada de Efeito de Poisson). Pela grande distância ao centro, este efeito é muito mais importante no bambu do que na madeira. Durante um ensaio à compressão no bambu, pode-se ver que o bambu fica mais espesso no meio, mas as duas placas metálicas estão a manter a amostra unida por fricção. Isto impede a deformação lateral no topo e na base, dando uma falsa impressão da resistência à compressão” (Janssen, J.J., 2000) . Arce-Villalobos, O.A. (1993) descobriu que se tem de fazer esta correção nos ensaios à compressão, de maneira minimizar o atrito entre a amostra e as peças da máquina que se encostam nela. Até essa data era desconhecido este fenómeno, obtendo valores que não correspondiam à realidade. Umas peças de aço pousadas em teflon permitem que a amostra, por efeito de Poisson, consiga mexer-se livremente, obtendo um valor mais perto da realidade.

Nogata, F. and Takahashi, H. (1995) concluíram que a resistência do bambu depende das cargas a que esteve sujeito durante a sua vida enquanto planta.

Segundo Janssen, J.J. (2000), a propriedade mecânica mais importante é a massa do material por unidade de volume, a densidade, variando normalmente entre 700 e 800 kg/m³. Daqui pode-se perceber que quanto maior for a densidade, mais pesado vai ser por unidade de volume, resultando num aumento de moléculas presentes no mesmo volume, e consequentemente no aumento dessas propriedades desejáveis, para a maioria dos casos. Conclui-se, portanto, que quanto mais pesado for o bambu, melhor se vai comportar. Indo ainda mais longe, o autor define uma relação entre a sua densidade com a tensão de rotura à flexão, compressão e corte. Os valores são de 0,14, 0,094 e 0,021 respetivamente, que multiplicados pela densidade (kg/m³) dão as respetivas resistências últimas (MPa). Relacionando os vários componentes do bambu, indica valores de referência aos módulos de elasticidade da parte exterior, de 21 GPa, e da parte interior, 3,5 GPa. Por haver esta diferença é claro que o valor de EI vai ser superior ao que seria caso houvesse uma distribuição uniforme.

O mesmo autor refere também que uma das características notáveis do bambu é a rotura por flexão, considerando que não é uma verdadeira rotura. Contrariamente a uma viga de betão, que abre uma fenda que vai progredindo até dividir a peça em dois bocados, uma cana de bambu submetida à flexão não atinge a rotura das fibras, existindo apenas uma rotura do elo de ligação entre elas, fazendo com que a sua secção circular perca resistência. Caso se descarregue a viga, o material voltará à sua geometria tubular, o que é altamente vantajoso caso a estrutura seja atingida por um furacão ou terremoto. O autor sugere para os ensaios à flexão os valores de 17000 MPa para o módulo de elasticidade, de 62 MPa para a tensão de cedência, e 0,3 para o coeficiente de Poisson para contração lateral.

Janssen, J.J. (2000) consegue chegar a um valor do comprimento crítico do bambu quando solicitado à flexão, cujo valor não se conseguiu concluir por Vaessen, M.J. and Janssen, J.J. (1997). Este comprimento quando é excedido, tem uma rotura por flexão e que, caso contrário, tem uma rotura por corte. O seu valor é dado por $L_{crítico} = 26,3 * D_{exterior}$. Para estar do lado da segurança pode-se utilizar o valor de 30 diâmetros. No caso do vão ser inferior a este valor, a amostra irá ter uma rotura por corte, e caso o vão seja superior, irá ser uma rotura por flexão. Uma das razões pela qual os resultados para os ensaios à flexão serem dispersos é pela ignorância deste fenómeno, pois se for pretendido determinar a resistência última de flexão, o vão livre não poderá ser inferior a $L_{crítico}$.

As espécies *Bambusa Pervariabilis* e *Phyllostachys pubescens* são muito utilizadas nos andaimes em Hong Kong. Segundo Chung, K.F. and Yu, W.K. (2002) o teor em humidade é a característica física que mais afeta a sua resistência, como também já foi referido anteriormente. O autor começa por fazer um estudo piloto, ensaiando alguns provetes à compressão, para verificar se existia muita diferença de resistência para diferentes posições ao longo da cana (base e topo) tendo em conta a variação de

diferentes propriedades físicas como o diâmetro, a espessura das paredes, a densidade, e o teor em humidade.

Tabela 2 – Ensaio à compressão para diferentes posições - (Chung, K.F. and Yu, W.K., 2002)

Chung2002 (Compressão)	Força de rotura (kN)		Tensão de rotura (MPa)		Modulo E. (GPa)	
	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo
<i>Bambusa Pervariabilis</i>	60	30	60	80	4	12
<i>Phyllostachys Pubescens</i>	100	50	50	70	5	10

Para estes ensaios houve dois modos de rotura, um por separação das fibras – “*Splitting*”, e outro por esmagamento das extremidades – “*End Bearing*”. Os provetes que possuíam um alto teor em humidade foram consistentes com este último, enquanto as mais secas colapsavam por “*Splitting*”. Para a primeira espécie, *Bambusa Pervariabilis*, as propriedades físicas são praticamente constantes ao longo da cana. O diâmetro é bastante uniforme, mantendo-se sempre por volta dos 45 mm, a seção média é de 750 mm² e tem uma variação de 250 mm², uma vez que a espessura das paredes varia de 8 para 4 mm da base para o topo. Já para a segunda espécie, ***Phyllostachys Pubescens***, as diferenças já são significativas. O diâmetro varia de 80 para 50 mm, a espessura de 10 para 6 mm e consequentemente a área média é de 1750 mm² com a variação de 1000 mm².

Ainda o mesmo autor Chung, K.F. and Yu, W.K. (2002), faz uma série de testes sistemáticos para conseguir ter uma população suficientemente grande para poder determinar valores característicos das propriedades mecânicas. O teor em humidade foi dividido em 3 intervalos, < 5% (TH1), entre 5 e 20% (TH2), e > 20% (TH3) para a primeira espécie, sendo o segundo intervalo da segunda entre 5 e 30% (TH2). Para os ensaios à flexão (Tipo I) foi utilizada uma amostra com 1000 mm de vão livre simplesmente apoiado, e para os ensaios à compressão foram utilizadas amostras com a altura 2 vezes superior ao diâmetro exterior. Os resultados podem-se ver na seguinte tabela.

Tabela 3 – Resultados de ensaios sistemáticos - (Chung, K.F. and Yu, W.K., 2002)

Chung 2002	Flexão (MPa)			Módulo E. Flexão (GPa)			Compressão (MPa)			Módulo E. Compressão (GPa)			Densidade ρ (kg/m3)
	TH1	TH2	TH3	TH1	TH2	TH3	TH1	TH2	TH3	TH1	TH2	TH3	
<i>Bambusa Pervariabilis</i>	109	82	52	22	18,5	16,4	103	69	48	10,3	9,3	6,8	708,8
Desvio padrão	17	17	9	5	4,3	4,7	15	12	8	2,4	2,9	2,2	87,02
<i>Phyllostachys Pubescens</i>	85	88	76	13,2	11,4	9,6	134	75	57	9,4	7,8	6,4	793,9
Desvio padrão	21	19	13	24	2,8	2	10	18	8	2,1	1,9	1,2	108,3

Contudo, para chegar aos valores característicos, Chung, K.F. and Yu, W.K. (2002) utilizou um método próprio utilizando fatores de segurança que achava mais apropriados. Esses valores não interessam referir agora, uma vez que no capítulo das normas se irá explicar como se determinam os mesmos utilizando fatores de segurança segundo as normas existentes. Aqui, é importante referir que

existem variações importantes entre o módulo de elasticidade quando a peça está sujeita a esforços de flexão e compressão, sendo o valor do último mais baixo. Um estudo mais aprofundado sobre estas duas espécies e sua utilização nos andaimes é feito por Chan, K.F.C.a.S.L. (2003).

Embora já fosse utilizado durante muitos anos para este tipo de estruturas, os andaimes eram montados seguindo a intuição e experiência de quem os erguia. Alguns estudos foram levados avante para que o bambu fosse utilizado de uma maneira mais segura e estruturalmente melhorado. Nos andaimes, os esforços são maioritariamente de compressão, e o fenómeno associado aos elementos solicitados à compressão é a encurvadura. Para elementos esbeltos, este fenómeno é muitas vezes condicionante. Yu, W.K. [et al.] (2005) publicaram o artigo estudando este efeito. O mesmo autor diz que em Hong Kong e em redor continua a preferir-se os andaimes de bambu aos de aço. O tempo de montagem e desmontagem dos andaimes de aço é aproximadamente o mesmo, enquanto que para os de bambu o tempo de desmontagem é um décimo do tempo de montagem. Para além disso, são precisas apenas ferramentas simples e cordas de nylon ou de aço. Concluiu, como era de esperar, que a resistência é altamente afetada pela presença de travamentos laterais, e que a encurvadura é sempre crítica nos andaimes. Mais à frente, no capítulo das normas irá ser descrito como ter em conta o fenómeno da encurvadura.

Tabela 4 – Propriedades Mecânicas - (Yu, W.K. [et al.], 2005)

Yu (2005)	Módulo E. Flexão (GPa)		Compressão característica (5º percentil) (MPa)		Imperfeição inicial
	Seco	Húmido	Seco	Húmido	
<i>Bambusa Pervariabilis</i>	22	16,4	79	35	16 L/1000
<i>Phyllostachys Pubescens</i>	13,2	9,6	117	44	8,5 L/1000

Este artigo fornece apenas os resultados para o módulo de elasticidade para esforços de flexão, médio, e o 5º percentil da resistência à compressão. É dada também uma imperfeição inicial que deve ser considerada para o cálculo à encurvadura.

Foram feitos trabalhos, como o de Pereira, L.V.G.a.M.A.d.R. (2004), que sugerem procedimentos para a determinar certas propriedades físicas do bambu, adotando literatura utilizada para as madeiras. Contudo, as normas de que mais à frente se falará têm estes fatores em conta.

Um estudo bastante completo acerca das características físicas e mecânicas feito à espécie *Guadua angustifolia*, com uma média de 3 anos de idade, foi feito por Ghavami, K. and Marinho, A.B. (2005). Propriedades como as distâncias entre nós, o diâmetro externo e a espessura da parede são estudadas e aproximadas a equações que têm em conta a distância até à base do caule. Determinam também umas equações aproximadas para a variação da fração volumétrica de fibras ao longo da espessura do bambu, dividindo a cana em 3 secções, base, meio, e topo. A mesma divisão por secções é feita para a determinação das resistências mecânicas. Vários ensaios foram feitos à tração, compressão, e ao corte, determinando também os parâmetros de interesse. Para sintetizar a informação, os resultados foram colocados na Tabela 5. A Figura 22, retirada do mesmo trabalho, apresenta as configurações das amostras utilizadas para tração, compressão e corte respetivamente.

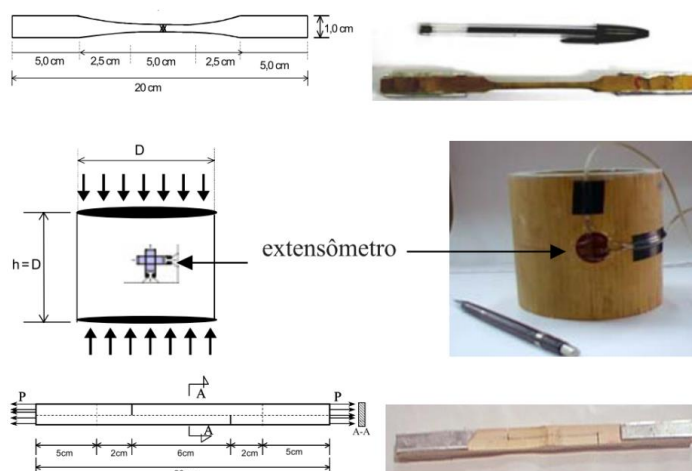


Figura 22 – Configuração das amostras - (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)

Tabela 5 - Resultados ensaios - (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005)

Ghavami (2005) <i>Guadua angustilofia</i>		Tração (MPa)	Modulo E. Tração (GPa)	C. Poisson Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Modulo E. Compressão (MPa)	C. Poisson Compressão (MPa)	Corte (MPa)	
Parte da cana	Base	s/Nó	93,38	16,25	0,19	28,36	14,65	0,27	1,7
		c/Nó	69,88	15,7	-	25,27	9	0,56	2,2
	Centro	s/Nó	95,8	18,1	0,25	31,77	12,25	0,36	1,4
		c/Nó	82,62	11,1	-	28,36	12,15	0,18	2,3
	Topo	s/Nó	115,84	18,36	0,33	25,27	11,65	0,36	2,1
		c/Nó	64,26	8	-	31,77	15,8	0,33	2,4
Valor Médio		86,96	14,59	0,26	28,47	12,58	0,34	2,0	
Variação		51,58	10,36	0,14	6,5	6,8	0,38	1,0	

Os resultados foram comparados com os obtidos para a espécie *Dendrocalamus giganteus*, num trabalho feito na Pontífice Universidade Católica do Rio de Janeiro, e verificou-se que a esta última espécie é mais resistente e a “diferença é de 43,8% na resistência à tração, 41,6% na resistência à compressão e 60% na resistência ao cisalhamento” (corte) (Ghavami, K. and Marinho, A.B., 2005).

O comportamento do bambu à flexão da espécie *Phyllostachys pubescens* foi estudado por Obataya, E. [et al.] (2007). O autor explica que o bambu é normalmente considerado mais flexível do que a madeira, embora a sua rigidez seja comparável. Separou a cana em várias tiras, querendo testar apenas estas ripas à flexão do tipo II. Concluiu que se a parte exterior da tira estiver virada para baixo, ou seja, à tração quando sujeita a cargas descendentes, a amostra mostrava bastante ductilidade. A zona exterior da cana, que é a que possui maior concentração de fibras, estaria tracionada, e a parte interior, que é de certa maneira “espumosa” constituída por células de parênquima, consegue deformar-se muito. Desta forma, a rotura dá-se de uma maneira dúctil. No caso de a secção ser invertida de 180°, a amostra passa a ser frágil. A parte espumosa não consegue expandir, abrindo fendas rapidamente. A ductilidade é, portanto, dada pela combinação destes dois materiais. Contudo, a cana de bambu inteira nunca consegue estar sujeita a este tipo de esforços, sendo que se estiver sujeito à flexão, a parede de um lado estará à compressão e a outra à tração.

No trabalho de Beraldo, A.L. [et al.] (2007) utiliza a técnica de Moiré, que permite quantificar as deformações com grande rapidez e precisão nos ensaios através de ondas eletromagnéticas. Ainda é uma técnica em evolução.

Takeuchi Tam, P. and González, C.E. (2007) escrevem sobre a compressão paralela às fibras da *Guadua angustifolia*. Os resultados médios obtidos para os ensaios estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados aos ensaios à compressão - (Takeuchi Tam, P. and González, C.E., 2007)

Takeuchi (2007) <i>Guadua angustifolia</i>			Compressão Médio (MPa)	Desvio Padrão	Modulo E. Compressão (MPa)	Desvio Padrão
Parte da cana	Base	s/Nó	50,11	8,64	17418	11929
		c/Nó	51,89	9,88		
	Centro	s/Nó	56,02	9,12	18130	4187
		c/Nó	56,75	9,56		
	Topo	s/Nó	58,12	12,38	17575	4377
		c/Nó	60,35	9,13		
Valor Médio			55,54	9,79	17708	6831

Méndez e Vallecilla (cit. Torres, L. [et al.], 2007) , em 2003, através de ensaios de propagação de ondas chegaram ao valor de 13,69 GPa para o módulo de elasticidade longitudinal da *Guadua angustifolia*, e Li (cit. Torres, L. [et al.], 2007), em 1999, ensaiando amostras da espécie *Phyllostachys pubescens* à flexão chegou ao valor de 13,4 GPa para a mesma propriedade. Sendo o bambu um material anisotrópico é necessário determinar as suas propriedades para as diferentes direções. Torres, L. [et al.] (2007) afirma ser o primeiro a procurar o módulo de elasticidade circunferencial. Apoiado em modelos de elementos finitos, um procedimento experimental foi realizado em busca deste valor. As amostras foram carregadas lateralmente, como se pode ver na Figura 23.

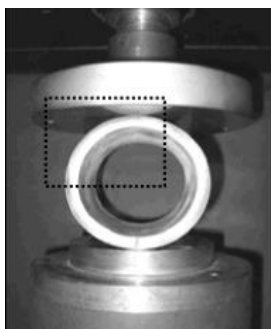


Figura 23 – Ensaios à compressão lateral - (Torres, L. [et al.], 2007)

Como é de esperar, a resistência do bambu quando solicitado perpendicularmente às fibras é muito inferior comparado com carregamentos na direção das fibras, e o seu módulo de elasticidade também. Os ensaios foram feitos em duas espécies, *Guadua angustifolia* e *Phyllostachys pubescens*. Para a primeira espécie o módulo de elasticidade circunferencial foi de 485 ± 172 MPa em média, apenas 3,5% do obtido por Ghavami, K. and Marinho, A.B. (2005) para o módulo de elasticidade longitudinal. Para a segunda espécie, o valor foi de $1,69 \pm 0,13$ GPa em média, aproximadamente 3,5 vezes superior ao da *Guadua angustifolia*. Foi cerca de 12,2% do valor do módulo de elasticidade longitudinal obtido também por Ghavami, K. and Marinho, A.B. (2005). Segundo o departamento de

agricultura (cit. Torres, L. [et al.], 2007), o rácio entre os dois módulos de elasticidade, longitudinal e circunferencial, de diferentes tipos de madeira varia entre 1,5 e 16,3 %, ficando nos dois casos dentro deste intervalo. Para a segunda espécie não houve variação de resultados entre amostras com diferentes comprimentos, e como era de esperar, os valores aumentam à medida que as amostras se afastam mais da base. Estes valores obtidos por Torres, L. [et al.] (2007) representam um módulo de elasticidade aparente na direção perpendicular do eixo longitudinal, tendo uma mistura de esforços de compressão e tração (Sharma, B. [et al.], 2013).

Segundo Lee et. al (cit. Berndsen, R.S., 2008) a densidade do bambu varia entre 0,5 e 0,79 g/cm³, sendo esta a propriedade física que está mais relacionada com a idade e também com as propriedades mecânicas. A densidade do bambu aumenta devido ao aumento da parede celular que ocorre ao longo dos anos. O mesmo autor recolheu dados de diferentes pesquisas sobre a densidade das espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys pubescens*, podendo consultar esses valores na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Densidade *Dendrocalamus giganteus* por Li – (cit. Berndsen, R.S., 2008)

Densidade (kg/m ³) cit. Berndsen (2008)	Oliveira 2006	Rivero 2003	Gonçalves et al. 2002	Ghavami 1992
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	680-760	580-790	570-750	800

Tabela 8 - Densidade *Phyllostachys pubescens* com (TH=12%) por Li -2004 - (cit. Berndsen, R.S., 2008)

Densidade (kg/m ³) cit. Berndsen 2008 <i>Phyllostachys pubescens</i>		Camada			Média	
		Externa	Centro	Interna		
Idade (Anos)	1	Base	610	320	290	410
		Meio	630	330	290	420
		Topo	610	340	320	420
	3	Base	810	600	560	660
		Meio	820	610	550	660
		Topo	840	600	550	660
	5	Base	810	660	580	680
		Meio	820	660	590	690
		Topo	840	630	580	680

Chun (cit. Berndsen, R.S., 2008), em 2003, apresentou outros valores para esta última espécie, de 590 kg/m³ na base, 650 kg/m³ no meio e 740 kg/m³ no topo. Encontrou diferentes densidades para diferentes idades, obtendo para 1 ano 420 kg/m³, para 3 anos 610 kg/m³, e para 5 anos 620 kg/m³. Refere ainda que nos climas húmidos e quentes (trópicos) os bambus são maiores mas menos densos, enquanto para os climas áridos e secos com temperaturas baixas (subtrópicos e climas temperados), as densidades são superiores. Para a posição geográfica em que Portugal se encontra, os bambus podem atingir uma densidade bastante grande. Quanto maior a densidade, maior será a resistência.

O teor em humidade é a razão entre a massa de água contida num elemento e a massa desse elemento seco. No bambu, o teor em humidade altera as propriedades mecânicas. Quanto maior for o teor em humidade, menores vão ser as resistências ao corte, flexão, compressão, tração e o módulo de elasticidade paralela às fibras. Pode-se observar na Figura 24 o decréscimo da resistência à compressão com o aumento do teor em humidade, da espécie *Phyllostachys pubescens*.

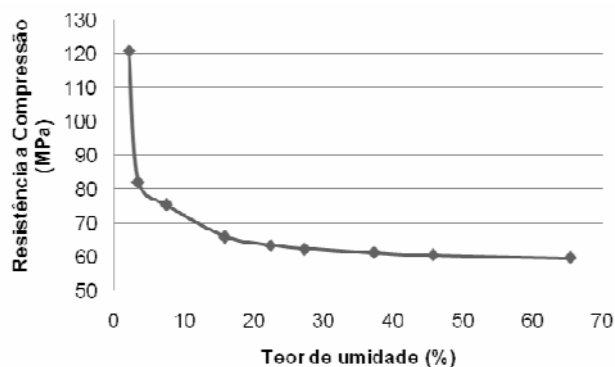


Figura 24 – Teor em humidade vs. Resistência à compressão – (cit. Berndsen, R.S., 2008)

A água dentro do bambu pode-se dividir em água livre e água de cristalização. A água livre pode, teoricamente, ser facilmente retirada pois é a água que está dentro dos vasos. O outro tipo de água está alojado dentro das paredes celulares e mantém-se unida às microfibras dessas paredes. Quando se seca o bambu, a água livre sai primeiro e só depois sai a de cristalização (Berndsen, R.S., 2008). A transição é chamada de ponto de saturação das fibras, e segundo KISHEN et al. (cit. Berndsen, R.S., 2008) para a maior parte dos bambus é de 20-22%, mas para o *Phyllostachys pubescens* é de 13%, segundo Ota (cit. Berndsen, R.S., 2008). O processo para se retirar esta última é longo e pára quando a humidade do bambu estiver em equilíbrio com a humidade do ambiente. Segundo Chun (cit. Berndsen, R.S., 2008), para diferentes idades o bambu tem um teor em humidade diferente. Para a espécie *Phyllostachys pubescens* esse valor é de 135% para um ano, e 77% de seis a sete anos de idade.

A perda de humidade está relacionada com a retração. Este fenómeno é de ter em conta no bambu devido ao seu alto teor em humidade pelo facto de a retração poder induzir tensões internas importantes, o que no caso de a secagem ser demasiado rápida, leva à fissuração. Chun (cit. Berndsen, R.S., 2008) explica que a retração é maior onde há mais feixes vasculares, e sendo que a parte exterior da parede tem maior concentração de feixes, tem uma secagem superior à parede interior, abrindo rachas. Evita-se este efeito secando as peças mais lentamente. O bambu é um material higroscópico que muda o teor de humidade em função da humidade relativa do ar. Nas estruturas é por isso importante ter em conta que, para ambientes em que haja constantes variações de humidades, vai haver variações de volume e de resistência. Segundo Ahmad (cit. Berndsen, R.S., 2008), a madeira só começa a retrair-se quando o teor em humidade é inferior ao ponto de saturação das fibras, enquanto o bambu se começa a retrair mal perde humidade.

As propriedades mecânicas do bambu foram comparadas com as do pinheiro e do betão por Ghavami (cit. Berndsen, R.S., 2008).

Tabela 9 - Propriedades mecânicas por Ghavami 2002 – (cit. Berndsen, R.S., 2008)

Ghavami 2002 cit. Berndsen (2008)	Material		
	Bambu	Pinheiro	Betão
Densidade (kg/m ³)	580-700	530	2400
Tração axial (MPa)	240	100	2
Compressão axial (MPa)	65	50	25
Flexão (MPa)	120	120	2,4

Chun (cit. Berndsen, R.S., 2008), em 2003, determinou algumas propriedades mecânicas do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, que se podem ver na Tabela 10, em função da idade e da localização ao longo da cana. Os resultados são os obtidos pelo autor.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas de *Phyllostachys Pubescens* segundo Chun – (cit. Berndsen, R.S., 2008)

	Chun 2003 cit. Berndsen (2008)	Tração (MPa)	E. Tração (MPa)	Compressão (Mpa)	E. Compressão (MPa)	Flexão (MPa)	E. Flexão (MPa)	ρ (kg/m ³)
Idade (Anos)	1-2	91,1	11909	63,5	7716	153,7	10770	-
	3-4	176,4	11229	63,6	8448	162,2	10370	-
	5-6	184,1	11457	63,4	7607	158,6	11323	-
	7-8	177	12416	64,7	9041	161,2	10893	-
	9-10	189,1	11267	63,6	8221	160	11131	-
	Média	163,5	11656	63,8	8207	159,1	10897	-
Posição (Metros)	1	157,9	10158	60,9	5533	138,7	10460	737
	2	190,9	10839	63,9	6452	147,3	11348	775
	3	194,2	11572	69,9	6886	152,1	11961	786
	4	202,1	12066	68,1	7148	152,7	12102	793
	5	208,9	12469	70	7330	160,8	12008	804
	6	215,3	12725	70,5	-	162	12778	808
	7	221,1	12855	71,1	-	170,1	13320	818
	Média	198,6	11812	67,8	6669,8	154,8	11996,7	789

O mesmo autor cita uma tabela do trabalho de Li de 2004 que relaciona a idade com a densidade (ρ) com a resistência à flexão e com o módulo de elasticidade à flexão longitudinal para a mesma espécie. A informação está disposta na Tabela 11.

Tabela 11 – Densidade e resistência à flexão de *Phyllostachys P.* segundo LI, 2004 –(cit. Berndsen, R.S., 2008)

Li 2004 cit. Berndsen (2008)		Flexão (MPa)	E. Flexão (MPa)	ρ (kg/m³)
Idade (Anos)	1	Base	110,3	7770
		Meio	119,3	8680
		Topo	117,2	8929
	3	Base	151,0	10039
		Meio	151,7	10122
		Topo	160,6	10397
	5	Base	186,2	13162
		Meio	184,8	13410
		Topo	183,4	13307
Média		151,6	10646	664

Para a espécie *Dendrocalamus giganteus*, Gonçalves et al. (cit. Berndsen, R.S., 2008) obteve os seguintes valores de resistência:

Tabela 12 - Resistência de *Dendrocalamus giganteus* - (cit. Berndsen, R.S., 2008)

Gonçalves et al. cit. Berndsen (2008)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Flexão (MPa)
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	161	89	298

O método de Brinell é o método mais utilizado para medir a dureza dos metais. Pode-se também aplicar este método para determinar a dureza de outros materiais. Ostapiv (cit. Berndsen, R.S., 2008), em 2007, diz que o pinheiro tem dureza de 1,6 a 2,3 Brinell, enquanto o bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* é de 4 a 6 Brinell, segundo a Organização Holandesa para Aplicações Científicas e Pesquisa, embora o mesmo autor tenha encontrado para a mesma espécie um valor de 8 Brinell com 5 anos de idade. Berndsen realizou ensaios para determinar a dureza da mesma espécie para diferentes idades – ver Tabela 13. O mesmo autor faz ensaios de resistência à abrasão para a possibilidade de se utilizar bambu para pavimentos, e teve um bom comportamento.

Tabela 13 – Dureza de Brinell - (Berndsen, R.S., 2008)

Berndsen (2008)		Dureza Brinell Média (MPa)
Idade	1	4,47
	3	5,35
	5	6,74

Ainda falando de Berndsen, R.S. (2008), o mesmo realizou vários ensaios à espécie *Phyllostachys pubescens* para a determinação de propriedades mecânicas - ver Tabela 14 - com um teor em humidade de 12%. Foi feita uma relação entre a densidade e as várias propriedades através de gráficos que aqui não serão mostrados.

Tabela 14 – Propriedades mecânicas de *Phyllostachys pubescens* - (Berndsen, R.S., 2008)

Berndsen (2008)		Tração (MPa)		Compressão (MPa)		E. Compressão (MPa)		Flexão (MPa)		E. Flexão (MPa)		ρ (kg/m ³)	
		Médio	Desvio	Médio	Desvio	Médio	Desvio	Médio	Desvio	Médio	Desvio	Médio	Desvio
Idade (Anos)	1	181,5	37,1	35,3	9,9	3634,4	853,0	159,6	18,7	12990,6	1814,7	600,0	60,0
	3	181,2	33,2	41,4	6,8	4272,3	876,9	166,1	19,4	13618,4	1653,3	670,0	70,0
	5	180,7	28,8	40,9	8,1	4133,0	694,8	176,4	15,6	14554,7	1455,7	760,0	70,0
Média		181,1	33,0	39,2	8,2	4013,2	808,2	167,4	17,9	13721,3	1641,2	676,7	66,7

OSORIO SARAZ, J.A. [et al.] (2009) realizam um estudo sobre as propriedades mecânicas da espécie *Guadua angustifolia* com o intuito de utilizar o bambu para a industrialização de laminados. Realizou alguns ensaios tendo como comparação resultados obtidos por outros autores. Aproximadamente, esses valores de comparação variam entre 150-210 MPa para a resistência à tração, por volta dos 140 MPa para resistência à flexão, e um coeficiente de Poisson que varia entre 0,22 e 0,35. Para os ensaios realizados por OSORIO SARAZ, J.A. [et al.] (2009) foram utilizadas amostras sem a presença de nós. Os valores médios obtidos nos ensaios à tração foram de 222,69 MPa e 3085,9 MPa para a resistência e módulo de elasticidade respetivamente. E para os ensaios à flexão os resultados médios foram de 135,46 MPa para a resistência, 3930,92 MPa para o módulo de elasticidade, e 0,25 para o coeficiente de Poisson. Comparando os resultados com os da literatura recolhida pelo autor, só os resultados à tração é que variaram ligeiramente. Para este tipo de ensaios é normal que possa haver grandes variações de resultados, consequência da forma como se agarram as amostras nas suas extremidades, que em certas ocasiões pode levar a grandes erros de leitura (OSORIO SARAZ, J.A. [et al.], 2009).

“A relação entre a resistência à tração e o peso específico é uma característica importante para o material usado em estruturas, Ghavami (1990) mostra que esta relação para o bambu é 2,73 vezes maior do que para o aço. Um benefício disto é que as estruturas de bambu poderão possuir menor peso próprio” (RABELO, I.D., 2009). Na Tabela 15, citada do mesmo trabalho, pode-se ver a justificação desta afirmação.

Tabela 15 - Relação entre a resistência à tração e a densidade por Ghavami - (RABELO, I.D., 2009)

Ghavami 1990		Tração (MPa)	Densidade (ρ) (kg/m ³)	R=Tração/ ρ	R/Raço
Material	Aço A500	500	7830	64	1,00
	Bambu	140	800	175	2,73
	Bronze	703	8860	79	1,24
	Ferro forjado	423	7700	55	0,83
	Latão	400	7510	53	0,83
	Alumínio	304	2790	109	1,70
	Ferro fundido	281	7200	39	0,62

No mesmo trabalho, RABELO, I.D. (2009) cita um gráfico do trabalho de Chun da curva de crescimento do bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* - Figura 25. Pode-se observar que a idade ideal, ou seja, aquela em que o bambu atinge a resistência máxima, é aos 6 anos.

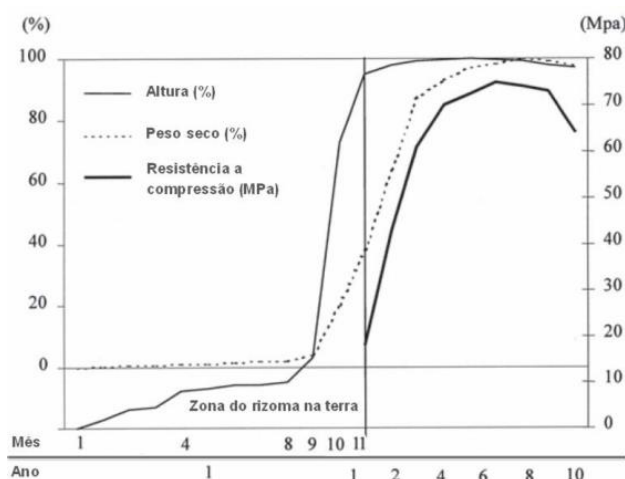


Figura 25 – Curva de crescimento do bambu por Chun - 2003 –(cit. RABELO, I.D., 2009)

O bambu tem um bom comportamento para ações sísmicas e dinâmicas, o que faz com que possa ser adequadamente utilizado em estruturas de cobertura que estão sujeitas à ação do vento.

Outra comparação do comportamento estrutural é feita com o aço e a madeira no trabalho realizado por Obermann, R.L.T.M. (2003/2004). Estas comparações são importantes para demonstrar que o bambu é realmente um material credível e que faz frente aos materiais usados mais frequentemente na construção civil. O autor utilizou barras com 2,5 metros de comprimento, com um peso aproximadamente de 8,7 Kg para cada material e calculou as resistências das peças à compressão, segundo o Eurocódigo 5 e 7 e tendo em conta a carga de Euler. Os resultados estão expostos na Tabela 16.




compresión a una barra de 2.5 m y 8.7 kg de materiales distintos	Madera tipo B EC5	S10/MS10	Guadua EC5	Acero, A36 EC3	S235
Densidad g/cm ³	0.55		0.7	7.8	
E-Modul KN/cm ²	740		600	21000	
Fuerza adm. a compresión KN/cm ²	1.1		1.5	23.5	
Sección					
	D=9cm	D=12cm d=9cm	D=5.1cm d=4.5cm		
Area A cm ²	63.6	49.5	4.4		
Inertia I cm ⁴	322.1	695.8	12.7		
Esbeltez λ	111.1	66.7	147.2		
Peso kg	8.7	8.7	8.7		
Fuerza max adm. KN	15.1	25.6	27.6		
Precio / metro Colombia / Alemania €	2 5	1 3	4 8		
ECOCOSTO $\frac{M/m^2}{N/mm^2}$ (8)	80	30	1500		

Tabela 16 – Comparação entre bambu, madeira e aço - (Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)

Correal D, J.F. and Arbeláez C, J. (2010) fizeram um estudo para determinar as propriedades mecânicas da espécie *Guadua angustifolia*, variando as amostras com a idade e a localização ao longo da cana. Os ensaios foram feitos conforme previsto na norma ISO, e a determinação das propriedades físicas também. Na tabela abaixo podem-se ver os resultados obtidos. É de notar que o teor em humidade nas amostras era muito alto (amostras ainda verdes com teor em humidade > 30%), sendo que os resultados são inferiores aos que se obtinha para canas secas.

Tabela 17 – Propriedades mecânicas da *Guadua Angustifolia* (verde) - (Correal D, J.F. and Arbeláez C, J., 2010)

Correal D, J. (2010)		Compressão (MPa)	E. Compressão (GPa)	Flexão (MPa)	E. Flexão (GPa)	Corte (MPa)	ρ (kg/m³)	
Idade (Anos)	2	Base	39,9	15,5	93,6	16,9	7,2	674,5
		Meio	27,2	14,9	84,7	17,7	7,5	678,1
		Topo	20,4	20	107,3	16,1	7,2	703
		Média Idade	28,6	16,4	95,8	16,9	7,3	687,3
	3	Base	38,1	16,5	88,8	16,7	7,4	681,9
		Meio	42,1	18	91,6	15,8	8,2	705,5
		Topo	42,6	17	97,8	19,4	8,1	828,6
		Média Idade	41	17,2	92,7	17,1	7,9	748
	4	Base	37,6	17,4	86,9	17	7,5	617,3
		Meio	41,5	16,8	103,7	17	8	780
		Topo	42,1	17,5	103,8	18,3	7,6	774,1
		Média Idade	40,4	17,2	98,5	17,4	7,7	725,9
5	Base	32,1	15,2	86,3	18	6,6	676,9	
	Meio	34,7	16,5	86,9	18,7	7,4	780	
	Topo	39	18,2	107	15,5	8	735,4	
	Média Idade	35,2	16,8	93,4	17,4	7,3	686,1	

García, J.J. [et al.] (2012) estudaram as propriedades anisotrópicas do bambu *Guadua angustifolia*. Para os coeficientes de Poisson circunferencial-axial para as diferentes partes da cana, obtendo 0,43 para a base, 0,14 para a parte central, e 0,12 para a parte superior. O módulo de elasticidade circunferencial foi de 398 MPa (valor um pouco diferente do obtido por Torres).

“O bambu é um material anisotrópico e heterogêneo que possui força e rigidez ao longo do eixo longitudinal, versus pobres propriedades mecânicas na direção transversal” (Jiang, Z. [et al.], 2012). O mesmo autor faz um estudo sobre peças carregadas transversalmente, medindo as diferenças se estiver solicitado biaxialmente. O rácio entre o segundo e o primeiro carregamento é de 2,4 a 2,5. Contudo, não está especificado qualquer valor para as propriedades mecânicas do material.

Sharma, B. [et al.] (2013) estudaram as propriedades mecânicas transversais do bambu. Chamaram ao ensaio proposto por Torres, L. [et al.] (2007), referido anteriormente, de “edge bearing test” no qual se comprime a amostra, de secção inteira, transversalmente. Concluíram que este ensaio se aproxima bem à resistência última transversal do bambu. E sendo um ensaio que é fácil de se fazer no campo, pode passar a ser utilizado fora do laboratório. Os autores realizaram ensaios às espécies *Phyllostachys aurea* e *Bambusa stenostachya*. As peças eram carregadas pelas faces superior e inferior, denominaram as faces de acordo com a rosa-dos-ventos para se poder perceber quais as propriedades em cada direção. Pode-se ver isso na figura seguinte.

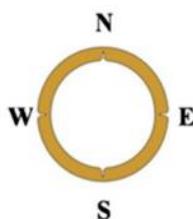


Figura 26 – representação das amostras - (Sharma, B. [et al.], 2013)

Pela mesma figura pode-se identificar as zonas onde surgem as trações, que são coincidentes com as zonas onde se encontram fissuras. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados da compressão transversal - (Sharma, B. [et al.], 2013)

Sharma (2013) (Valores médios)	E (MPa)		σ NS (MPa)		σ EW (MPa)	
	Médio	Desvio	Médio	Desvio	Médio	Desvio
<i>Phyllostachys aurea</i>	526	262	11,5	4,7	6,5	2,7
<i>Bambusa Stenostachya</i>	492	208	5,8	1,53	3,3	0,88

Existe ainda outro método para determinar as propriedades mecânicas perpendiculares. O ensaio chama-se de “split pin test”, e pode-se observar na Figura 27, o esquema este proposto por Mitch, D. [et al.] (2010). Como este ensaio é extremamente difícil de executar, é mais vantajoso utilizar o “end bearing test”, uma vez que dele se obtém resultados satisfatórios.

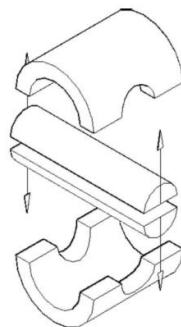


Figura 27 – Esquema de “Split pin test” - (Mitch, D. [et al.], 2010)

Para a zona de entrenós, a direção transversal é a direção fraca do bambu, isto é, a direção que oferece menos resistência. É importante ter cuidado quando se dimensionam estruturas de bambu com a secção da cana inteira. Zonas de ligações são as partes críticas, porque é aí que existem esforços transversos grandes e consequentemente esforços de corte. Assim sendo, como as zonas dos nós são resistentes a cargas perpendiculares, as ligações entre elementos devem ser feitas o mais perto possível dos nós.

Outra propriedade importante do bambu e também da madeira é a rigidez à abertura de fendas. É um tema complexo que só recentemente tem sido estudado, e não será abordado no presente trabalho. Para os leitores interessados neste assunto podem consultar os trabalhos de Mitch, D.R. (2009), Low, I.M. [et al.] (2006a), Low, I.M. [et al.] (2006b) e Liou, N.-S. and Lu, M.-C. (2011).

3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que não faz parte do âmbito deste trabalho a execução de ensaios ao bambu, neste capítulo procura-se recolher informação sobre o que foi feito com vista a saber o máximo sobre as propriedades mecânicas do bambu. O objetivo foi chegar a valores médios que permitam dar sensibilidade quando faz um pré-dimensionamento. Escusado será dizer que para elaborar um projeto de execução deverão efetuar-se ensaios em canas do mesmo habitat e características das que se vão utilizar.

Como é de esperar, um material que cresce na natureza tem bastantes variáveis que vão afetar as suas propriedades mecânicas, como por exemplo a espécie biológica, a geografia do local de plantação, a idade, o procedimento de secagem, a colheita, o tratamento, a densidade, o teor em humidade, a dimensão, o diâmetro, etc.. A procura das suas características tem sido uma tarefa extensa e muitas vezes com bastante dispersão nos resultados. Com a aplicação e evolução das normas espera-se que os valores sejam cada vez mais uniformes.

Como resumo, neste capítulo expuseram-se os resultados alcançados em ensaios de determinação das características mecânicas do bambu que interessam para a sua utilização como material estrutural - resistência máxima à tração, à compressão e ao corte nas direções longitudinal e transversal, e à flexão. A rematar, construiu-se a Tabela 19 com valores alcançados pelos diversos autores, e calculou-se uma média por espécie e uma média final para todas as espécies. Os valores referidos na tabela são valores médios de ensaios – alguns realizados por diferentes processos – e não podem por isso ser utilizados em dimensionamento de estruturas. Eles servem apenas para dar alguma sensibilidade acerca das características mecânicas alcançadas em ensaios.

Tabela 19 – Propriedades Mecânicas – Resumo dos ensaios

espécie	Autores	Tração (MPa)	E. Tração (MPa)	Compressão (Mpa)	E. Compressão (MPa)	Compressão ⊥ (MPa)	E. Transversal ⊥ (MPa)	Flexão (MPa)	E. Flexão (MPa)	Corte L (MPa)	Coef. Poisson	ρ (kg/m3)
<i>Phyllostachys</i>	Glenn 1950	-	-	-	-	-	-	145	14500	-	-	-
<i>Phyllostachys aurea</i>	Sharma 2013	-	-	-	-	9	526	-	-	-	-	-
<i>Phyllostachys Pubescens</i>	Duff 1941	198	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Li 1999	-	-	-	13400	-	-	-	-	-	-	-
	Torres 2007	-	-	-	-	-	1690	-	-	-	-	-
	Chun 2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	660
	Chun 2003	182	11734	66	7738	-	-	157	11447	-	-	789
	Li 2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	587
	Li 2004	-	-	-	-	-	-	152	10646	-	-	664
	Berndsen 2008	181	-	39	4013	-	-	167	13721	-	-	677
<i>Phyllostachys Pubescens (seco)</i>	Chung 2002	85	13200	134	9400	-	-	-	-	-	-	794
<i>Phyllostachys Pubescens</i> & <i>Phyllostachys reticulata</i>	Ota 1950	-	-	82	-	-	-	-	-	13	-	916
Carat. Mecânicas médias da espécie Phyllostachys		162	12467	80	8638	9	1108	155	12579	13	-	727
<i>Bambusa blumeana</i>	Janssen 1981	-	-	85	-	-	-	63	20500	10	0,41	-
	Arce-Villalobos 1993	275	-	-	18785	-	-	-	-	-	-	687
<i>Bambusa nutens</i>	Sekhar et al. 1961-1962	-	-	46	-	-	-	78	12100	8	-	-
<i>Bambusa pervariabilis (seco)</i>	Chung 2002	109	22000	103	10300	-	-	-	-	-	-	700
<i>Bambusa spinosa</i>	Teodoro 1925	-	-	-	-	-	-	55	10300	-	-	-
	Espinosa 1930	-	-	67	-	-	-	128	-	-	-	-
<i>Bambusa Stenostachya</i>	Sharma 2013	-	-	-	-	5	492	-	-	-	-	-
<i>Bambusa vulgaris</i>	Teodoro 1925	-	-	-	-	-	-	33	18400	-	-	-
	Sharma 1990	173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carat. Mecânicas médias da espécie Bambusa		186	22000	75	14542	5	492	71	15325	9	0,41	693
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Oliveira 2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	720
	Ribeiro 2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	685
	Gonçalves et al. 2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	660
	Ghavami 1992	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800
	Gonçalves 2000	161	-	89	-	-	-	298	-	-	-	-
<i>Dendrocalamus strictus</i>	Lymae 1952	-	-	57	-	-	-	88	13800	-	-	-
	Karachandani 1959	186	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sekhar et al. 1961-1962	-	-	54	-	-	-	95	14850	-	-	-
Carat. Mecânicas médias da espécie Dendrocalamus		174	-	67	-	-	-	160	14325	-	-	716
<i>Gigantochloa pseudoarundinacea</i>	Seprayitno 1988	178	27631	-	-	-	-	-	-	-	-	690
	Seprayitno 1988	149	19643	-	-	-	-	-	-	-	-	629
<i>Gigantochloa scortechini</i>	Arce-Villalobos 1993	-	-	-	-	2	2445	-	-	-	-	789
Carat. Mecânicas médias da espécie Gigantochloa		164	23637	-	-	2	2445	-	-	-	-	702
<i>Guadua angustifolia</i>	Ghavami 2005	87	14590	28	12580	-	-	-	-	-	0,30	-
	Takeuchi 2007	-	-	56	17768	-	-	-	-	-	-	-
	Méndez e Vallecilla 2003	-	-	-	13690	-	-	-	-	-	-	-
	Torres 2007	-	-	-	-	-	485	-	-	-	-	-
	Osorio Saraz et al. 2009	223	3086	-	-	-	-	135	3931	-	0,25	-
	Correal D, J 2010	-	-	41	17200	-	-	93	17100	8	-	748
	Garcia 2012	-	-	-	-	-	398	-	-	-	0,23	-
<i>Guadua s.p.</i>	Arce-Villalobos 1993	-	2123	51	18465	3	-	-	-	-	-	743
Carat. Mecânicas médias da espécie Guadua		155	6600	44	15941	3	442	114	10515	8	0,26	746
-	Janssen 2000	-	-	-	-	-	-	62	17000	-	0,30	750
-	Meyer & Ekelund 1922	-	-	-	-	-	-	91	-	8	-	-
-	Meyer 1923	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Meyer and Ekelund 1923	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Atrops 1969	222	-	467	-	-	-	121	-	18	-	-
Generico	Ghavami 2002	240	-	65	-	-	-	120	-	-	-	640
Generico	Ghavami 1990	140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800
Vários espécies	Prawirohatmodjo 1988	315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Arundinaria tecta</i>	Cox 1969	110	18670	-	-	-	-	-	-	-	0,32	-
Carat. Mecânicas médias dos ensaios recolhidos		174	14742	87	13031	5	1006	116	13715	11	0,30	720

É de notar que há uma dispersão de resultados significativa, tendo de se ter em atenção ao consultar estes valores. O principal objetivo desta tabela é resumir o capítulo das propriedades mecânicas para se ficar com uma ideia dos valores médios para os diferentes esforços e para as diferentes espécies.

Para além da sua utilização como cana, a utilização de elementos laminados de bambu, estando já resolvidos os problemas de ligações entre peças, é análoga à da utilização de elementos laminados de madeira diferindo apenas na sua resistência mecânica. Para saber mais acerca deste tema, aconselha-se a leitura de Zhou, Q. [et al.] (2008), Xiao, Y. [et al.] (2010), Mahdavi, M. [et al.] (2011) e Sinha, A. [et al.] (2013). López e Correal (cit. Minke, G., 2012) indicam valores obtidos em peças de bambu laminado, da espécie *Guadua*, com um teor em humidade de 12 %:

- Resistência à compressão paralela às fibras: 48 MPa;
- Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras: 19,14 MPa;
- Resistência à compressão perpendicular às fibras: 5 MPa;
- Resistência à tração paralela às fibras: 132 MPa
- Módulo de elasticidade à tração paralela às fibras: 17,47 MPa;
- Resistência à tração perpendicular às fibras: 1,1 MPa;
- A densidade é de cerca de 1 200 Kg/m³ e é impermeável.

Ou seja, podemos concluir que o bambu laminado, tem enormes potencialidades estruturais, podendo ser um ótimo substituto da madeira estrutural e de outros materiais de construção convencionais.

4

LIGAÇÕES

“Ligações eficientes são fundamentais para a integridade das estruturas” (Jayanetti, D. and Follett, P., 1998). Não interessa utilizar um material com características mecânicas extraordinárias se não se consegue fazer com que as ligações transmitam os esforços de uns elementos para os outros. Por isso, estas são zonas da estrutura que requerem especial atenção e pormenor.

Nas estruturas em que o material estrutural é a cana de bambu, a sua ligação é um grande desafio. Isto em primeiro lugar pelo facto do bambu ser um material natural e portanto sem medidas uniformes. Na verdade, para se aproveitarem as suas melhores características, a sua utilização na forma natural, ao contrário da madeira, exige o aproveitamento integral de todo o seu material, o que implica que terão de ser as ligações a adaptar-se à sua forma real - o que dificulta a criação de modelos geometricamente iguais. Para além disso, a sua forma - redondo, tubular oco, com dimensões variáveis de cana para cana -, faz com que este tipo de ligações seja bastante diferente das ligações que tradicionalmente estão muito estudadas e testadas para estruturas de madeira. E como é preferível que as ligações se deem junto aos nós, e ao longo da cana os entrenós têm diferentes comprimentos, exige-se um grande cuidado na escolha do material e da geometria.

Embora o bambu apresente altas resistências na direção longitudinal, é suscetível a ser esmagado, principalmente se tiver as extremidades abertas (Jayanetti, D. and Follett, P., 1998). A utilização, por exemplo, de pregos ou parafusos sem que se abra um furo previamente não é aconselhada, uma vez que faz com que o bambu abra rachas. Existem inúmeras maneiras de ligar o bambu e muitos estudos já foram feitos sobre este tema. A grande limitação das ligações é que não são muito resistentes para forças de tração.

Na verdade, a madeira e o aço estrutural só se tornaram materiais estruturais adequados quando o problema das ligações ficou resolvido, tal como para as soluções de betão pré-fabricado. Ainda quando estes materiais estavam a ser desenvolvidos, inúmeras soluções para as ligações foram aparecendo para fazer com que estes materiais pudessem ser usados, e este é o caminho que tem de ser seguido para as ligações do bambu. No dia em que o problema das ligações estiver totalmente resolvido, irão ver-se estruturas de bambu nas estruturas mais modernas (Janssen, J.J., 2000). Isto não quer dizer que não existam métodos que permitam ligar os vários elementos, mas apenas que este assunto carece ainda de bastante investigação de maneira a que o bambu possa ser utilizado em todo o seu potencial. Hoje, a maior parte das ligações estão limitadas a uma determinada força, bastante inferior ao potencial de resistência do bambu.

O bambu pode ser um ótimo substituto para os materiais como o aço e madeira, e por ser um material leve tem grandes potencialidades para vencer vãos grandes, por exemplo, coberturas. Para este tipo de estruturas, as treliças e estruturas que estão solicitadas apenas com esforços axiais são as preferidas para serem utilizadas pelos projetistas pelo que, para que tal seja possível com canas de bambu, é necessário que as ligações resistam bem a esforços de compressão e de tração.

Assim sendo, neste capítulo procura-se identificar os tipos de ligações que se podem aplicar nas estruturas de construção civil e a sua resistência face a diferentes esforços que possa estar sujeita. Como não se pretende neste estudo realizar ensaios, toma-se palavra dos trabalhos realizados por outros autores que já o fizeram.

Tradicionalmente, o mais comum são as ligações feitas com cordas. Para além de serem mais simples, é o método mais económico de o fazer. Tem a grande desvantagem de não resistirem a esforços muito grandes e de terem grandes deformações. Por isso, tem sido feito um esforço grande de procura de soluções que aproveitem melhor as características de resistência do bambu. E a evolução tem sido através da utilização de tarugos de madeira e de bambu, de cabos de aço, de peças metálicas e pela utilização de parafusos. A maior parte destes métodos exige que se fure a cana de bambu, o que debilita bastante a zona do bambu em que são feitos. Mas de qualquer forma, este tipo de ligação tem sido bastante utilizado.

Sendo o bambu um elemento tubular oco, a transferência de forças pode dar-se de três maneiras possíveis: Através do interior da cana, do exterior, ou da própria secção transversal como recorda Janssen, J.J. (2000) no seu trabalho escrito em 1981 sobre as ligações. Este autor classifica as ligações em 8 grupos diferentes, conforme as situações em que duas ou mais peças se ligam:

- Grupo 1 – secção transversal total: É a mais tradicional com utilização de cordas.
- Grupo 2 – do interior para um elemento paralelo dando maior rigidez à secção do bambu com enchimento do seu interior. Muitos autores fizeram ligações enchendo as canas com argamassas ou colocando barras metálicas por dentro. E mais recentemente têm surgido alternativas, preenchendo o interior das canas com madeira que é colada por dentro da secção.
- Grupo 3 – do interior para um elemento perpendicular
- Grupo 4 – da secção transversal para um elemento paralelo: São utilizados elementos de madeira ou aço.
- Grupo 5 - da secção transversal para um elemento perpendicular: São utilizados parafusos.
- Grupo 6 – do exterior para um elemento paralelo: Variante moderna das cordas tradicionais. São simples e relativamente resistentes.
- Grupo 7 – do exterior para um elemento perpendicular
- Grupo 8 – ligações para tiras de bambu

Embora os grupos 3 e 7 tenham algum significado teórico, não têm grande aplicabilidade prática. Isto acontece porque a força para os grupos 2 e 6 é transmitida por atrito e as forças ao se tornarem perpendiculares (grupos 3 e 7), deixam de funcionar desta maneira. O grupo 8 não se aplica à construção com a secção inteira das canas.

Widyowijatnoko, A. (2012), que considera que esta classificação não tem interesse prático, e propõe outro tipo de classificação para as ligações, descrito no trabalho de Widyowijatnoko & Trautz (cit. Widyowijatnoko, A., 2012). Esta classificação é baseada nos seguintes princípios:

- Separação conforme a transferência de forças. Compressão paralela ou perpendicular às fibras, tração, ou atrito pelo interior ou exterior da cana.

- Separação conforme a localização do conector. Seja no interior ou exterior da cana, paralelo ou perpendicular às fibras.
- A transferência de forças dá-se entre o bambu e o seu conector. Duas canas de bambu ligadas podem ter dois tipos de transferência de forças diferentes.

Forma 6 tipos de grupos diferentes:

- Grupo 1 – A força é transferida através de compressão por contacto com a secção total.
- Grupo 2 – A força é transferida por atrito à superfície interior ou aos entrenós da cana.
- Grupo 3 – A força é transferida por atrito à superfície e exterior da cana.
- Grupo 4 – A força é transferida por corte à parede da cana por um elemento perpendicular às fibras por dentro (4A) ou por fora (4B).
- Grupo 5 – A força é transferida perpendicularmente às fibras.
- Grupo 6 – A força é transferida por compressão radial para o centro da cana através de corte e por tensões perpendiculares às fibras.

Na verdade, esta última classificação parece ser mais feliz do que a feita por Janssen, J.J. (2000), mostrada anteriormente, porque aborda a ligação conforme a transferência de forças do bambu para o conector ou diretamente para outra cana de bambu em vez de abordar a forma da ligação. As diferentes canas ligadas podem pertencer a grupos diferentes, sendo a classificação referida à cana individual. Muito facilmente se identifica a que grupos as diferentes ligações pertencem. É importante que existam estas classificações para que seja facilitado o desenvolvimento das ligações. Permite que os investigadores sejam mais criativos e que consigam chegar a melhores soluções. E percebendo-se os princípios envolvidos, pode-se evoluir com mais facilidade na adaptação às ligações já desenvolvidas de forma a melhorar o seu potencial. Uma ligação pode pertencer a mais do que um grupo se tirar partido de mais do que um tipo de transferência de carga, que é o que acontece na maioria dos casos, sendo o grupo 1 utilizado para transferir compressão e os grupos 2, 3 e 4 para transferir tração. Idealiza-se que a melhoria das ligações no futuro vai passar por melhorar a combinação adequada e acertada dos diferentes grupos, tirando cada vez mais partido do verdadeiro potencial do bambu.

Por tudo isto, adota-se como mais adequada a classificação segundo Widyowijatnoko, A. (2012). Esta passa a ser descrita com recurso a exemplos citados do próprio trabalho de Widyowijatnoko, A. (2012) e também através de trabalhos consultados pelo autor desta tese.

4.1 GRUPO 1 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS ATRAVÉS DE COMPRESSÃO POR CONTACTO COM A SECÇÃO TOTAL

Este grupo é caracterizado por haver contacto das secções inteiras dos elementos. Só são considerados esforços de compressão, uma vez que são muito pouco resistentes para esforços de tração. A maioria pode ser resolvida com cordas e/ou cola para que haja estabilidade e resistência ao corte. A transmissão de forças dá-se ao encostar-se a ponta da cana ao elemento a ligar. Entre duas canas de bambu, a ligação de topo é a mais simples entre dois elementos – ver 1.1. da Figura 28, podendo também ligar-se na diagonal, como mostra 1.2. da Figura 28. Nesta última figura é de notar que a transferência de forças da cana diagonal para a horizontal é feita através do contacto da secção inteira, pertencendo ao grupo 1, enquanto a transferência de forças da horizontal para a diagonal dá-se perpendicularmente às fibras, pertencendo portanto ao grupo 5. Embora possa parecer estranho, a

união tem dois grupos distintos que não estão combinados. Lembra-se que os grupos são determinados apenas para a transmissão de forças de um elemento para outro, e não como conjunto.

Para esta última ligação do grupo 1, deve-se aumentar a área de contacto, evitando assim a concentração de esforços grandes. É aconselhável a utilização de um corte de “boca de peixe” na extremidade do elemento diagonal. Esta ligação pode ser encontrada em treliças, ou ligações em T, etc. Adicionalmente há que ter em atenção, nas ligações coladas, o facto da camada exterior da cana ser encerada, o que dificulta a aderência da cola.

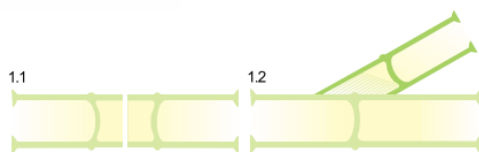


Figura 28 – Ligações Grupo 1 - (cit. Janssen, J.J., 2000)

Outra aplicação que encaixa neste grupo são as ligações de extremidade dos pilares, que na maioria das vezes utiliza o princípio do grupo 1 para se unir à fundação. É usual injetar betão no interior da cana e nele colocar um varão de aço que estabilize a fundação. Contudo, o princípio da transferência de forças continua a ser o mesmo, mesmo tendo outros elementos na união.

O grupo 1 é considerado o mais eficiente e forte para transmitir esforços de compressão (Widyowijatnoko, A., 2012).

4.2 GRUPO 2 - TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR ATRITO À SUPERFÍCIE INTERIOR OU COMPRESSÃO DOS ENTRENÓS DA CANA

Este grupo 2 estuda a transformação das forças de tração, induzidas por um elemento paralelo às fibras, em forças de atrito de forma a tracionar a cana de bambu. Existem diferentes maneiras de o fazer, umas mais eficientes que outras. Na maioria dos casos o bambu é preenchido com algum material como argamassa de cimento, resina, ou uma peça de madeira, com um parafuso ou varão que é o elemento paralelo às fibras que traz essas forças para fora do bambu.

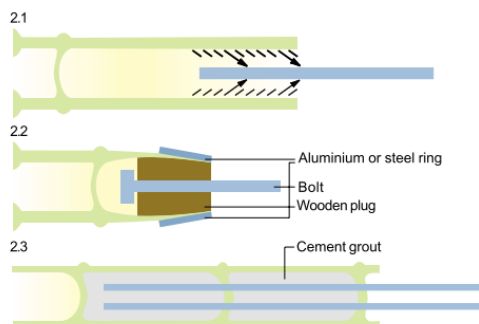


Figura 29 – Ligações Grupo 2 - (cit. Janssen, J.J., 2000)

A ligação da Figura 29-2.1 exemplifica o princípio deste grupo. A Figura 29-2.2 foi proposta por Duff (cit. Janssen, J.J., 2000), em 1941, que relata que uma cana com 64 mm de diâmetro resiste a 27 kN à tração.

O tipo de ligação da Figura 29-2.3 é o mais comum neste grupo 2. O arquiteto Simón Vélez tem dado bastante uso a esta solução nas suas obras. Pode também ser utilizado para compressão em que nesse caso se devem combinar os grupos 1 e 2.

Farbiaz (cit. Widyowijatnoko, A., 2012) realizou ensaios para determinar a capacidade resistente à tração de ligações compostas pelo enchimento de uma argamassa de cimento, um parafuso com 12,7 mm de diâmetro, uma porca e uma anilha para aumentar a área de contacto entre o parafuso e a argamassa. Foram feitas duas vertentes desta ligação, uma com um nó no meio, e outra sem esse nó em que os resultados foram de 10 kN e 2 kN respetivamente. Essa ligação foi inicialmente desenvolvida por Nienhuys (cit. Widyowijatnoko, A., 2012), em 1976 – ver Figura 30. Para estas ligações são abertos cortes longitudinais na extremidade da cana para que essa zona possa adaptar-se melhor à argamassa. São complementadas com uma abraçadeira metálica que dá aperto ao conjunto – ver Figura 31. O mesmo autor desenvolveu uma outra ligação – Figura 32 (esquerda), em que une duas canas com o mesmo diâmetro, utilizando peças de plástico. À medida que se aperta a peça, o cone aproxima-se mais do centro da peça, abrindo a peça envolvente ao cone, e deste modo aumentando a área de contacto, e consequentemente aumentando o atrito. Tudo isto é completado com a compressão do bambu pelo exterior, com uma abraçadeira, para evitar abertura de fendas e também para aumentar a aderência entre a cana e a ligação. (Widyowijatnoko, A., 2012)

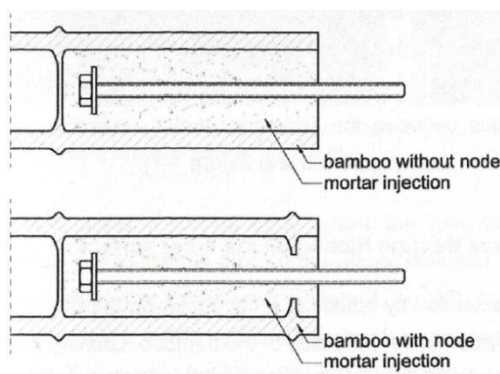


Figura 30 – Ligação com injeção de betão com e sem nó por Nienhuys, 1976 - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)



Figura 31 – Ligação por C. Tönges - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)

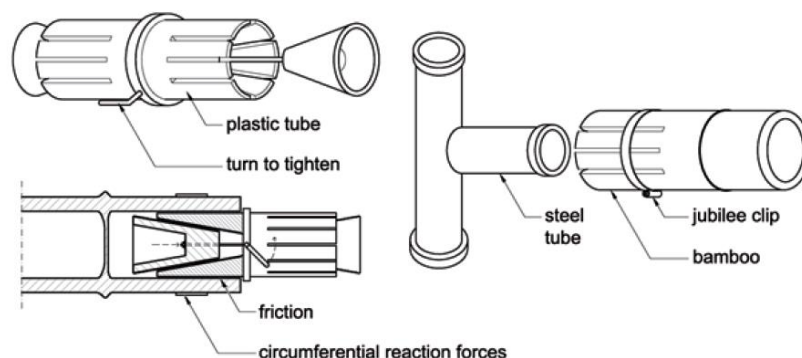


Figura 32 – Ligações propostas por Nienhuys, 1976 - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

Este tipo de ligação deve ter em conta que a distribuição de fibras não é homogênea ao longo da espessura da parede. A parte interior é a que tem menos concentração de fibras e consequentemente é a parte da parede menos resistente da cana. Para além disso, o interior é composto por uma camada espumosa que dificulta a adesão de outros materiais, o que pode levar a concluir que esta abordagem de transmitir os esforços ao bambu por dentro do mesmo pode não ser a melhor.

4.3 GRUPO 3 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR ATRITO À SUPERFÍCIE E EXTERIOR DA CANA

Tradicionalmente as ligações entre peças de bambu eram feitas de forma a mobilizar o atrito à superfície exterior da cana e, ainda hoje, grande parte das ligações que permitem a transmissão deste tipo de forças são as amarradas. Pode-se encontrar estas ligações amarradas em casas tradicionais ou em estruturas provisórias. São as mais simples e mais usadas ao longo dos tempos, mas como consequência de serem pouco resistentes e bastante deformáveis, perderam competitividade em relação a outros materiais. Esta situação tem levado a que ultimamente se estejam a estudar outro tipo de ligações que possam aproveitar melhor as suas excelentes características.

A camada exterior do bambu é dura e é a parte mais resistente da cana, sendo por isso mais competente para transmissão de esforços. Para amarração com corda ou cabos o bambu tem a forma perfeita. Ao ter uma secção circular, as forças distribuem-se uniformemente por toda a área de contacto, o que consequentemente aumenta também o atrito entre a corda e o bambu. (Widyowijatnoko, A., 2012)

Este tipo de ligações amarradas pode ser utilizado para unir canas de bambu em várias direções, podendo também ser ligadas para aumentar o comprimento das canas. É muito comum ver-se isso nos andaimes, quando os elementos verticais estão à compressão. Tirando partido da conicidade do bambu, o elemento inferior tem a base da cana (parte mais larga) em baixo, enquanto a cana a ligar está invertida, ou seja, com a parte com menor diâmetro junto à ligação. Quando as canas se deslocam uma relativamente à outra, dá-se um maior aperto à amarração – ver esquema da Figura 33. (Widyowijatnoko, A., 2012)

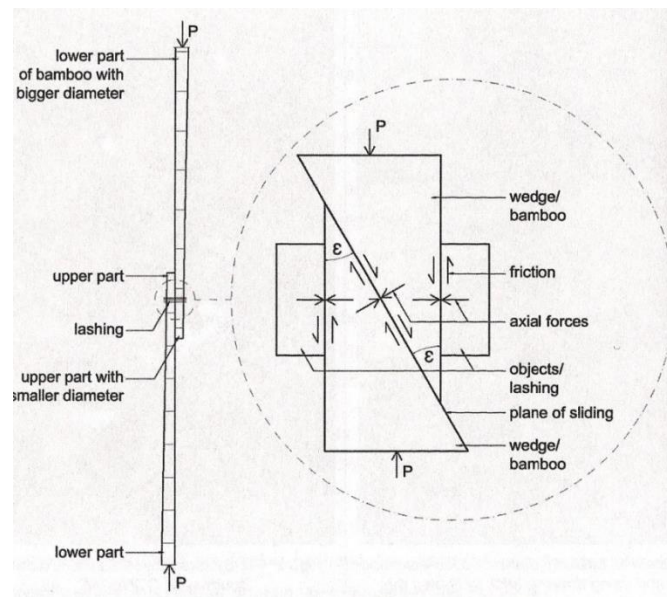


Figura 33 – Ligação por atrito - (Widyowijatnoko, A., 2012)

Para ligações amarradas, cujo material são cordas ou fibras de materiais naturais, é costume fazer-se a amarração com este material molhado. As cordas ao secarem vão retrain-se, dando de certa forma um pré-esforço natural, tornando a ligação mais rígida e forte.

Para além das ligações amarradas, pode-se utilizar umas peças metálicas propostas por Waldemar Rothe (cit. Widyowijatnoko, A., 2012) – ver Figura 34 - que apertam as canas de bambu de modo a que se mantenham na posição correta. Esta ligação pode ser utilizada para canas de diâmetro médio e pequeno e em diferentes direções. (Widyowijatnoko, A., 2012)



Figura 34 – Ligação por Waldemar Rothe - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

4.4 GRUPO 4 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR CORTE À PAREDE DA CANA POR UM ELEMENTO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS POR DENTRO (4A) OU POR FORA (4B)

Neste grupo as forças são transferidas através de um elemento que fura perpendicularmente a cana de bambu, como por exemplo um parafuso. Os esforços podem depois ser transmitidos para peças no interior (4A) ou exterior do bambu (4B). Os elementos de ligação que atravessam a cana de bambu induzem esforços de corte paralelo às fibras nas paredes da cana e como se sabe os entrenós do bambu não são muito resistentes a estes esforços. Os nós são os elementos com maior resistência para os esforços de corte e por isso é aconselhado que estas ligações se deem o mais próximo possível dos nós e de preferência que haja um nó entre o parafuso e a extremidade do bambu.

Do ponto de vista estético a solução 4A, com o elemento paralelo às fibras no interior da cana, é preferível uma vez que fica uma ligação mais limpa e menos pesada visualmente.

Muitos trabalhos de investigação das ligações de bambu começaram por se inspirar nas ligações de estruturas de madeira, tal como se pode ver a ligação da Figura 35 proposta por Mero (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004).

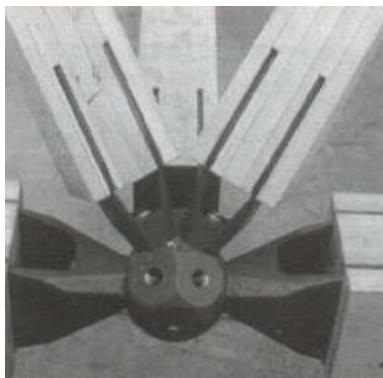


Figura 35 – Ligações de madeira por Mero - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)

Segundo Obermann, R.L.T.M. (2003/2004), as propostas e resultados existentes sugerem que a maneira mais eficiente de fazer ligações é utilizar parafusos de grande dimensão (do espanhol “Pasadores”) que transmitam a força a um elemento de aço que está dentro da cana de bambu. O trabalho do japonês Shoei Yoh (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004) utilizou parafusos grossos para formar uma cúpula geodésica, como se pode ver na Figura 36.

A partir dos resultados dos ensaios realizados para este tipo de ligação por Cesar Muñoz e Hugo Rodriguez, e por Jenny Garcón (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004) recomenda-se que a força máxima para cada parafuso de 13 mm seja de 6 kN para uma espessura média da parede de 1,5 cm. Neste caso, a força máxima a aplicar no parafuso corresponde à força que a cana de bambu consegue resistir.



Figura 36 – Cúpula geodésica por Shoei Yoh - (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)

Obermann, R.L.T.M. (2003/2004) utilizam o mesmo princípio de Shoei Yoh e desenvolvem uma ligação que é constituída por uma peça metálica cilíndrica com uma extremidade cônica. Nesta, a peça cilíndrica é colocada dentro da cana e através de um parafuso une-se essa peça a uma esfera que permite união com outros elementos. O esquema e a aplicação prática desta ligação pode observar-se na Figura 37. Essa peça metálica deverá ter um diâmetro exterior próximo do diâmetro interior do bambu a ser utilizado. Repare-se como a ligação no bambu é feita antes do ultimo nó, de forma a que se possa mobilizar ao máximo as suas capacidades.

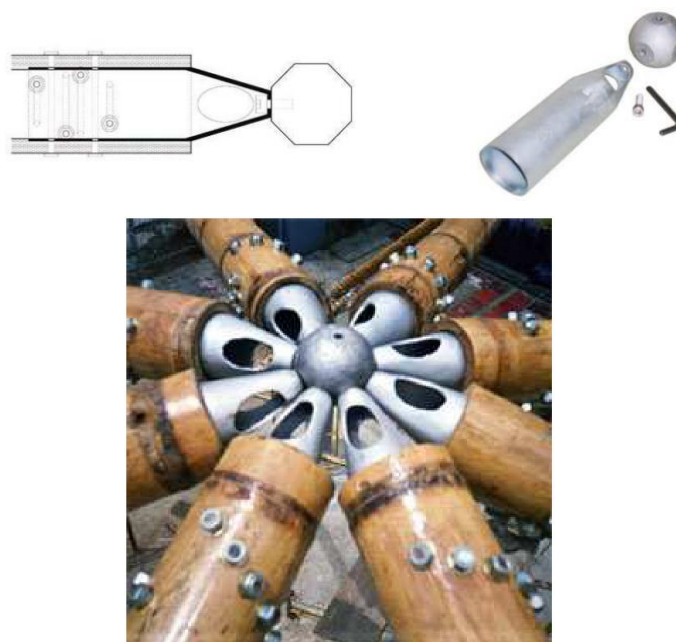


Figura 37 – Ligação proposta por (Obermann, R.L.T.M., 2003/2004)

No seu trabalho, Obermann, R.L.T.M. (2003/2004) utiliza um diâmetro exterior da peça metálica de 9 cm e um comprimento de 30 cm em que 20 cm entram dentro das canas. O restante fica de fora da cana para se fazer a ligação à esfera. As forças são transmitidas do bambu para os parafusos (por corte) que depois são transmitidas para o tubo de aço (também por corte).

O objetivo desta ligação é que seja leve e que possa transmitir o máximo de força possível. Com esta configuração, a estrutura fica fácil de montar e desmontar, caso seja necessário. O peso dos elementos de aço precisos para a ligação é de aproximadamente de 1,5 kg, enquanto as que utilizam betão injetado pesam cerca de 3 kg, ou seja, permitem que a estrutura seja mais leve.

Os ensaios foram realizados com diferente número de parafusos. Para um parafuso de 9 mm de diâmetro a peça resistiu a 10 kN para tração e compressão. Para 6 parafusos, a ligação resistiu a 60 kN. O bambu teve um bom comportamento e a rotura deu-se pelo elemento de aço o que é vantajoso por se poder mais facilmente calcular a resistência máxima da peça. O autor recomenda uma força máxima de 30 kN para o uso de 6 parafusos quer para tração quer para compressão.

Para o grupo 4B apresenta-se na Figura 38 os dois exemplos dados por Janssen, J.J. (2000), em que a força é transmitida através do exterior da cana.

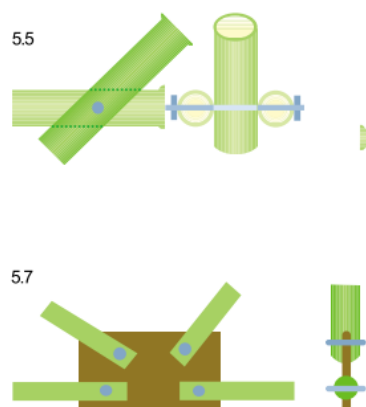


Figura 38 – Ligações grupo 4B - (cit. Janssen, J.J., 2000)

O estudo feito por LOZANO, J.V.G. and BARRERA, R.A.G. (2002) descreve o comportamento da espécie *Guadua* para uma ligação do tipo 5.5 da Figura 38 em que os entrenós que são atravessados pelo parafuso são enchidos com uma argamassa de cimento. Chama-lhe ligação “Simón Veléz” por ser o arquiteto quem tem usado com muita frequência estas ligações. É utilizado um parafuso de 5/8” (1,59 cm) e uma anilha entre a porca e o bambu e é esperada uma resistência máxima de 30 kN para cada cana. A rotura esperada é dada por um rasgão da secção, que é uma rotura típica por corte.

CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T. (2002) relata os resultados do trabalho realizado por Jenny Garcón de 1996 “optimizacion de estructuras de guadua” que utilizou uma ligação que consiste num parafuso que atravessa a cana. Não é dito nada para que tipo de ligação foi utilizado, mas presume-se que esteja dentro deste grupo. Encheu os entrenós da ligação com uma argamassa e obteve uma resistência à tração da ordem dos 35 kN à tração.

O mesmo autor faz ensaios a 2 tipos de ligações para a tração, em que uma das ligações pertence a este grupo e a outra à combinação do grupo 2 e 4. Os materiais utilizados são um parafuso de diâmetro de 1,58 cm, 12 parafusos de 6,35 mm e 1 metro de uma lâmina de 0,8 mm de espessura (calibre 22) e 4 cm de largura, que é enrolada à volta da cana. Pode ser considerada uma combinação entre o grupo 3 e 4 se for considerado o atrito da lâmina e a camada exterior do

bambu. Contudo, a lâmina está só a transferir as forças do parafuso grande para os pequenos, não devendo ser considerado o atrito, e portanto pertence a este grupo 4B. As forças são transmitidas ao parafuso maior através de um elemento por fora da cana. A configuração é a seguinte:

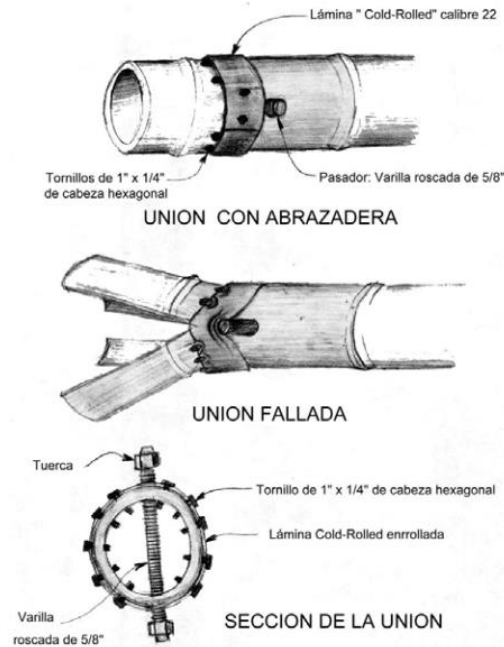


Figura 39 – Ligação do grupo 4B com lâmina metálica - (cit. CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T., 2002)

A resistência que esta ligação atingiu foi de 96 kN e deu-se conforme mostra a figura acima, sendo a equação matemática que permite calcular a força, a seguinte:

$$P = 5000 + 2200 * D - 2400 * d$$

Em que as dimensões dos diâmetros são dadas em centímetros e "P" é a resistência em quilograma-força. O fator de segurança é de 1,57. Contudo, recomenda-se para esta ligação não se ultrapasse os 20 kN, uma vez que tem deformações muito grandes antes da rotura.

LOZANO, J.V.G. and BARRERA, R.A.G. (2002) faz referência à ligação descrita em cima e na possibilidade de ser utilizada em estruturas trianguladas, como se vê na Figura 40.

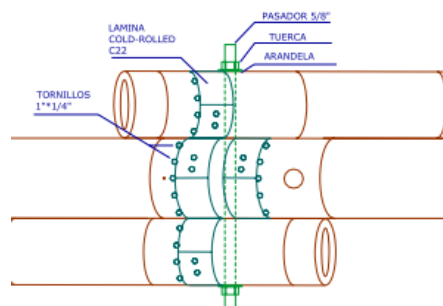


Figura 40 – Ligação por (LOZANO, J.V.G. and BARRERA, R.A.G., 2002).

4.5 GRUPO 5 – TRANSMISSÃO DAS FORÇAS PERPENDICULARMENTE ÀS FIBRAS

A este grupo pertencem às ligações de canas que estejam apoiadas noutras canas, sendo a maior parte delas em elementos de viga. Na Figura 28 o elemento horizontal transmite a força perpendicularmente às fibras para o elemento diagonal. É muito comum também em ligações em T, em que a cana apoia na outra transmitindo as forças da viga para o elemento vertical, fazendo com que pertença a este grupo. É muito vantajoso que esta ligação se dê na secção onde se encontre um nó, ou pelo menos perto disso, para que se possa tirar partido da transmissão de forças pelo diafragma do nó. Para que a área de contacto seja suficientemente grande para que não haja tensões muito grandes, deve-se utilizar um corte do tipo “boca de peixe” para o elemento vertical.

4.6 GRUPO 6 – TRANSMISSÃO DE FORÇAS POR COMPRESSÃO RADIAL PARA O CENTRO DA CANA ATRAVÉS DE CORTE E POR TENSÕES PERPENDICULARES ÀS FIBRAS

Este grupo foi criado pelo próprio autor (Widyowijatnoko, A., 2012), quando no seu trabalho de investigação para desenvolvimento de uma nova ligação se baseou neste princípio. Através da utilização de cordas ou cabos, isto é uma ligação amarrada, consegue transformar as forças de tração em forças de compressão radial pelo exterior do bambu. As ligações amarradas pelo exterior são as mais eficientes por se ajustarem perfeitamente à forma circular do bambu. Foram sempre utilizados cabos de aço de maneira a ter uma resistência superior ao que se teria se utilizasse cordas. Os problemas destas ligações amarradas surgem com a retração do bambu que faz com que a ligação perca rigidez, e que os cabos podem induzir um corte prematuro na cana tornando difícil determinar a sua resistência última e o respetivo fator de segurança. São aspetos que devem ser tidos em conta para chegar a uma solução melhor. As grandes vantagens destas ligações amarradas é que mobilizam a parte mais resistente do bambu, parte exterior, e são as mais simples de executar.

Widyowijatnoko, A. (2012) estudou várias possibilidades de ligações amarradas e também algumas ligações que estão nas combinações de outros grupos, tal como as ligações descritas nos parágrafos 4.7.6. a 4.7.8 mais à frente.

Estas ligações amarradas são materializadas por cabos que estão amarrados à parte exterior do bambu entrando dentro da cavidade do bambu por meio de pequenos buracos, sendo depois direcionados para a extremidade da cana. O objetivo é conseguir transformar os esforços de tração em esforços de compressão radial. Os buracos são pontos de elevada tensão sendo onde os cabos mudam de direção, e para proteger essa zona utilizam-se umas anilhas deformadas para cobrirem os buracos.

Estudou diferentes configurações para este tipo de ligações amarradas e comparou com ligações de grupos diferentes, chegando à conclusão que as primeiras têm mais vantagens. Dentro das amarradas ainda havia um grande leque de diferentes ligações, e como não podia ensaiar todas as possibilidades que tinha estudado, decidiu avançar com a que lhe pareceu melhor e que tinha mais vantagens. A escolhida foi a ligação com a configuração da seguinte figura.

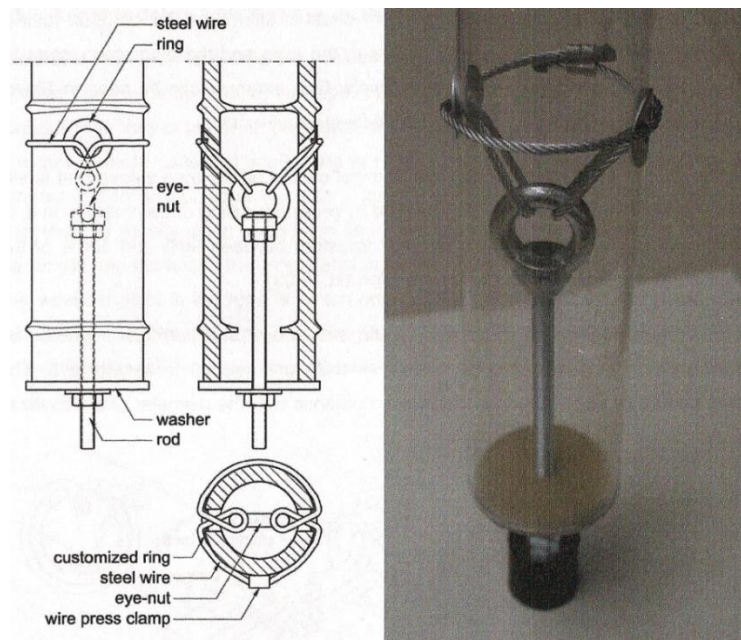


Figura 41 – Ligação amarrada - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

Já para ligações com mais do que um nó utilizou a configuração da Figura 42, visto que a configuração anterior não permitia ter mais do que um nó. Aumenta-se o número de nós, neste caso para 4, para que a ligação aumente a sua capacidade resistente. Os esforços são transmitidos do bambu para os cabos, que por sua vez passam a força para o parafuso que está no interior, que traz as forças para fora da cana do bambu. A extremidade é tapada com uma placa circular de, por exemplo, madeira para proteger o seu interior. O parafuso passa por este elemento e através duma porca pode-se introduzir uma tensão inicial para que os elementos todos fiquem na posição correta.

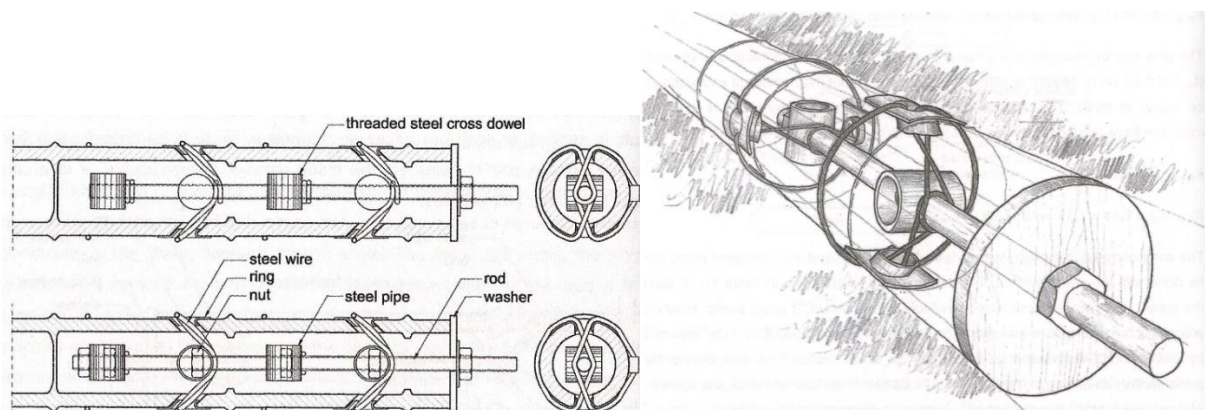


Figura 42 – Ligação com 4 nós - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)



Figura 43 – Amostras dos ensaios - (Widyowijatnoko, A., 2012)

Ensaiou as 3 amostras da Figura 43 que tiveram uma resistência média de 34 kN. A rotura de duas das amostras deu-se junto aos buracos, em que o cabo começou por deformar a anilha metálica e depois começou a rasgar as paredes do bambu até à rotura. A melhoria da geometria desta peça metálica, que é feita com uma anilha deformada, é uma das maneiras de aumentar a resistência desta ligação. Outra é melhorar a configuração dos nós feitos com os cabos.

Widyowijatnoko, A. (2012) realiza também 3 ensaios à ligação de 4 nós, podendo ver-se uma amostra preparada na Figura 44.

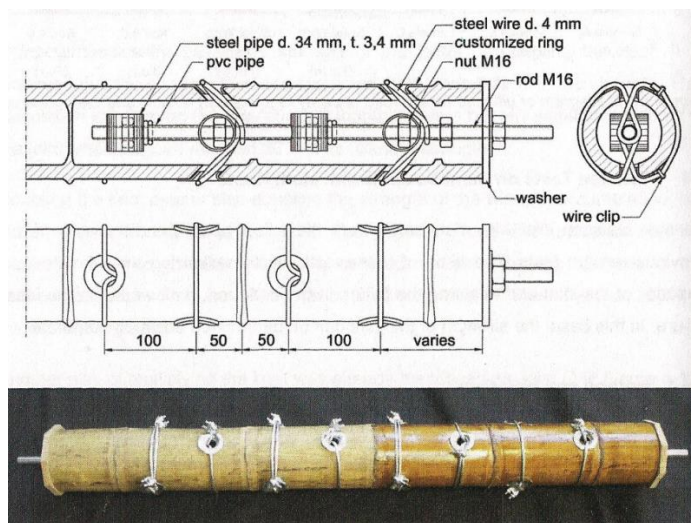


Figura 44 – Amostra de 4 nós - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

A resistência média foi de 77 kN e tal como se esperava, a rotura deu-se pelo parafuso M16. O grande objetivo do autor era de conseguir que a rotura se desse por um elemento que tivesse uma resistência fácil de prever. Tal não é possível se a rotura se der pelo bambu, porque sendo um material natural há uma grande dispersão nos resultados. Por outro lado, se a rotura se der pelos elementos de aço, a sua previsão é bastante mais simples. Como se sabe, os parafusos são fabricados com uma precisão bastante alta e fiável. Por isso, o dimensionamento das ligações torna-se extremamente fácil, precisando apenas de se determinar a resistência do parafuso em uso.

Para o efeito de dimensionamento, o autor destas ligações faz algumas prescrições. Começa por referir que a rotura deve dar-se sempre pelo parafuso e o bambu deve ter no mínimo 10 mm de espessura de parede. Este pré-requisito permite que cada nó possa chegar a pelo menos 24 kN, 80% do resultado mais baixo obtido para o ensaio com apenas 1 nó, relativo às amostras da Figura 43. Pode aumentar-se o número de nós conforme for necessário aumentar a resistência da ligação. Widyowijatnoko, A. (2012) sugere que se utilize a Tabela 20 para fazer esse dimensionamento. Repare-se que a resistência dos nós e dos cabos é sempre superior ao valor da resistência característica do parafuso (“rod”). Contudo, considera-se que a utilização de um fator de segurança de 2 é demasiado, uma vez que a rotura se dará pelo parafuso de aço, em que um fator de 1,5 seria suficiente. Repare-se que as peças metálicas junto aos buracos têm uma influência significativa na resistência dos cabos. A melhoria destas peças aumentaria bastante esta resistência, podendo utilizar-se um parafuso para cabos menos espessos.

No.	Rod				Knot		Steel Wire	
	Class	Diameter	Allowable Load with F.S. of 2	Ultimate Load Capacity ($F_{u,r}$)	Number of Knots	Ultimate Load Capacity ($F_{u,k,l}$)	Diameter	Ultimate Load Capacity ($F_{m,w}$)
		mm	kN	kN		kN	mm	kN
1	4.6	12	16.86	33.72	2	48.00	4	45.19
2					3	72.00	3	40.25
3		16	31.40	62.80	3	72.00	4	67.78
4					5	120.00	4	112.97
5	8.8	14	46.00	92.00	4	96.00	5	138.39
6					5	120.00	4	112.97
7		18	76.80	153.60	8	192.00	4	180.76

Tabela 20 – Tabela de dimensionamento de ligações - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

Uma configuração possível de um conjunto de peças de bambu ligadas pode-se observar na Figura 45. Os elementos à compressão podem utilizar o princípio do grupo 1.



Figura 45 – Configuração de um possível nó da estrutura - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

4.7 COMBINAÇÕES DE GRUPOS

A maioria das ligações combina mais do que um grupo. Todos os grupos podem ser combinados entre si, exceto com o grupo 5 que é usado num contexto diferente. Existem várias combinações possíveis, embora só algumas tenham sido usadas até ao dia de hoje. Algumas dessas combinações vão ser descritas nos seguintes parágrafos. O próprio Widyowijatnoko, A. (2012) propõe algumas alterações a ligações existentes, adicionando princípios de transferência de forças tornado a ligação mais robusta.

4.7.1 GRUPOS 1 E 2

Uma possível combinação dos grupos 1 e 2 é a proposta de ligação por Arce-Villalobos, O.A. (1993). No seu estudo propõe uma forma de ligação utilizando peças de madeira que são coladas na extremidade da cana. A parte que fica de fora tem diferentes geometrias para diferentes tipos de ligação – ver Figura 46.

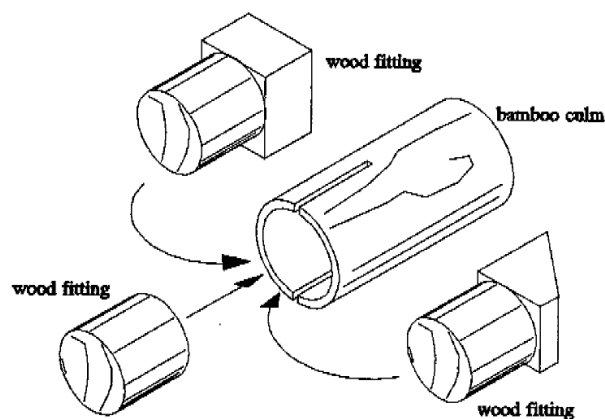


Figura 46 – Ligação por (Arce-Villalobos, O.A., 1993)

Pelo facto de ter as extremidades tapadas é vantajoso do ponto de vista de durabilidade, uma vez que o protege contra fungos, roedores e impede que fiquem humidades concentradas nestes pontos. A transferência de forças de compressão pode-se dar de duas maneiras possíveis, apenas por atrito interior da cana, ou pela soma do atrito e o contacto da peça de madeira com a extremidade do bambu. No primeiro caso, a ligação pertence apenas ao grupo 2, enquanto no segundo caso pertence á combinação dos dois grupos 1 e 2. É de notar que o funcionamento da ligação é bastante melhorado caso haja a combinação destes dois grupos.

Outra combinação destes dois grupos (1 e 2) é a ligação desenvolvida por Cristoph Tönges e Evelin Rottke – ver Figura 47.

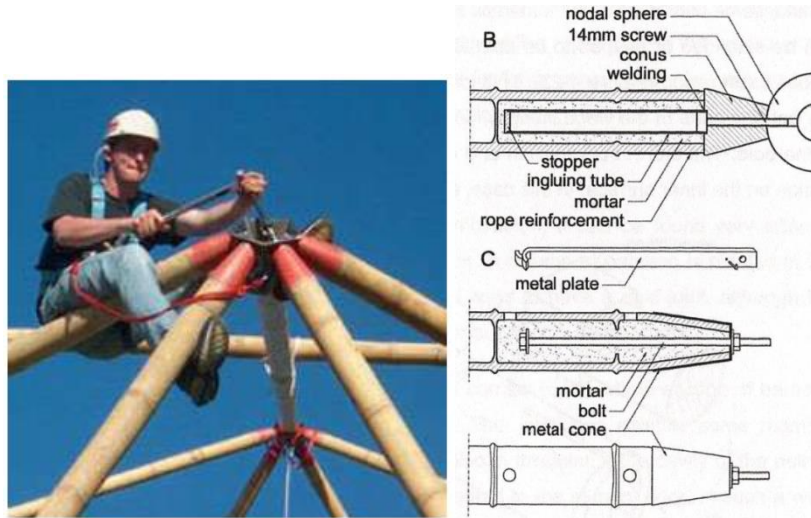


Figura 47 – Ligação C. Tönges – (cit. Obermann, R.L.T.M., 2003/2004) à esquerda e (cit. Widyowijatnoko, A., 2012) à direita

4.7.2 GRUPOS 1 E 3

A combinação dos grupos 1 e 3 é muito comum nas ligações de fundação de pilares em construções tradicionais. O pilar é envolvido em betão, que por atrito da parede exterior da cana e por contacto direto da secção transmitem os esforços à fundação. (Widyowijatnoko, A., 2012)

4.7.3 GRUPOS 1 E 4

Dunkelberg (cit. Janssen, J.J., 2000), em 1985, fez um estudo de várias ligações e um exemplo pode-se ver na seguinte Figura 48, pertencente ao grupo 4A, caso o elemento horizontal esteja à tração.

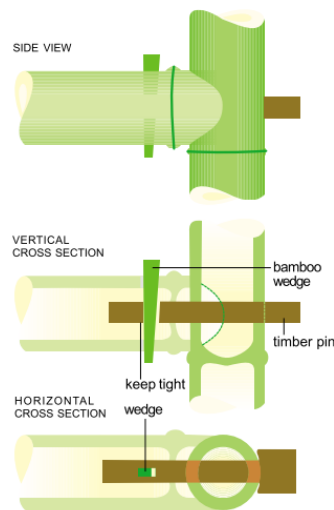


Figura 48 – Ligação por Dunkelberg – 1985 - (cit. Janssen, J.J., 2000)

4.7.4 GRUPOS 2 E 4

Outra ligação testada por CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T. (2002) utiliza argamassa para encher o entrenó da ligação, um parafuso com 1,58 cm de diâmetro e ainda vários parafusos pequenos que estão fora do mesmo alinhamento horizontal e vertical, de maneira a não localizar a redução da seção transversal e longitudinal, tal como mostra a seguinte figura:

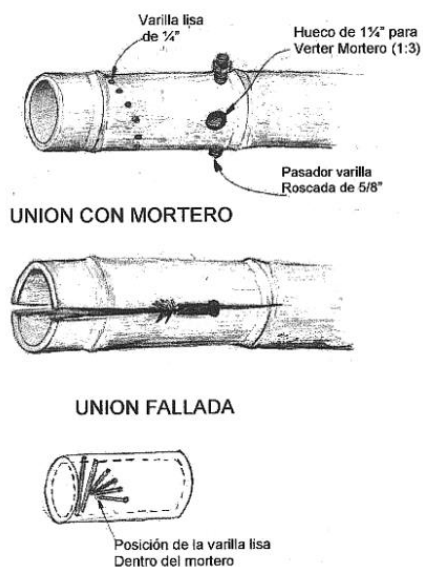


Figura 49 – Ligação do grupo 4B com enchimento de argamassa - (cit. CHEATLE, L.F.L.M.a.D.T., 2002)

Esta última ligação pertence a uma combinação dos grupos 2 e 4B. A resistência deste tipo de ligação foi de 60 kN, e a rotura dá-se por falha da argamassa. Uma das soluções apontadas pelo autor para melhorar esta ligação é aumentar a qualidade da argamassa.

Fornece ainda expressões para calcular a carga máxima em função dos diâmetros das peças:

$$P = -600 + 2400 * D - 2500 * d \quad (1)$$

Em que as dimensões dos diâmetros são dadas em centímetros e “P” é a resistência em quilograma-força, contando com um fator de segurança de aproximadamente 3.

4.7.5 GRUPOS 3 E 4B

Ligações amarradas muitas vezes utilizam a combinação destes princípios para obter uma maior rigidez e segurança. São normalmente complementadas com a utilização de tarugos de madeira ou de bambu inseridos nas canas de bambu perpendicularmente às fibras, transferindo as forças por corte. As cordas ou outro material de amarração tratam de transferir as forças por atrito – Figura 50. Nas construções mais recentes, substitui-se os tarugos por parafusos não sendo necessário a utilização de cordas. A desvantagem desta ligação é a excentricidade na transferência de carga. (Widyowijatnoko, A., 2012)

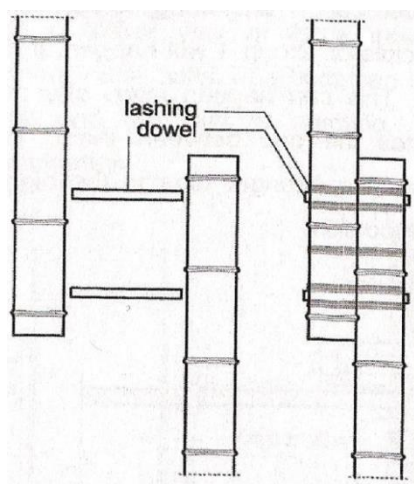


Figura 50 – Ligação dos grupos 3 e 4B - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

4.7.6 GRUPOS 1, 2 E 4A

Widyowijatnoko, A. (2012) relata que a ligação de Arce-Villalobos, O.A. (1993) pode ter uma resistência superior se utilizar um parafuso, como se pode ver na Figura 51. Com a introdução deste elemento adiciona-se o princípio do grupo 4A.

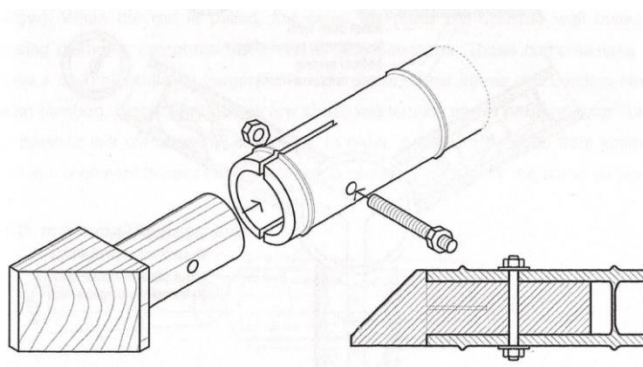


Figura 51 – Modificação da ligação por Arce-Villalobos - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

4.7.7 GRUPOS 2, 3 E 4A

Na Universidade de Delft, na Holanda, foi desenvolvido uma ferramenta chamada de “Delft wire lacing tool” que permite dar bastante aperto a arames metálicos. Foi desenvolvido para agrupar postes de madeira, tendo também aplicabilidade para o bambu.

Uma ligação proposta por Renzo Piano (cit. Widyowijatnoko, A., 2012) pode-se ver na Figura 52 (esquerda), e embora não tenha sido especificada como foi realizada, pode-se aplicar o princípio proposto por Widyowijatnoko, A. (2012) da Figura 52 (direita) que utiliza estes arames amarrados com esta ferramenta. O funcionamento desta ligação passa pelo aperto dos arames, puxando e rodando simultaneamente, aumentando desta forma o atrito entre a parede interior do bambu e a madeira, assim como a madeira e a peça metálica (Grupo 2), uma vez que os arames passam por furos introduzidos no bambu e na madeira. Quando se aplicam forças de tração são induzidos esforços de corte (grupo 4A).

O atrito entre os arames e a parede exterior da cana de bambu é também aumentado com o aperto (grupo 3).

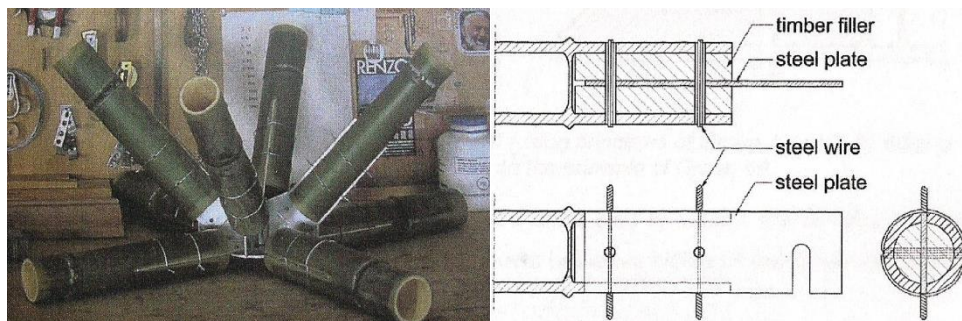


Figura 52 – Ligação proposta por R. Piano adaptada por Widyowijatnoko, A. (2012)

4.7.8 GRUPOS 2 E 6

Widyowijatnoko, A. (2012) tira partido dum sistema de molas utilizado em montanhismo para se aplicar nas ligações de bambu. Este equipamento é formado por umas garras dentadas e por um cabo de aço que quando é puxado faz com que as garras se afastem mais. Este mecanismo transforma forças de tração em forças de compressão radial (inverso do princípio do grupo 6), aumentando também o atrito com o material envolvente. Usando este princípio pode-se aplicar no interior do bambu, com várias molas para não concentrar muito as forças, consegue-se transformar forças de tração em forças de compressão perpendicular às fibras numa direção radial. Como o bambu tem pouca resistência nesta direção, é suscetível de abrir fendas. Para evitar que tal aconteça podem utilizar-se cordas amarradas no exterior do bambu. Pode ver-se o esquema desta ligação na Figura 53. Para casos de um nó de uma treliça, resolvem-se os esforços de tração deste modo, enquanto os de compressão pode-se transferir a força pelo princípio do grupo 1.

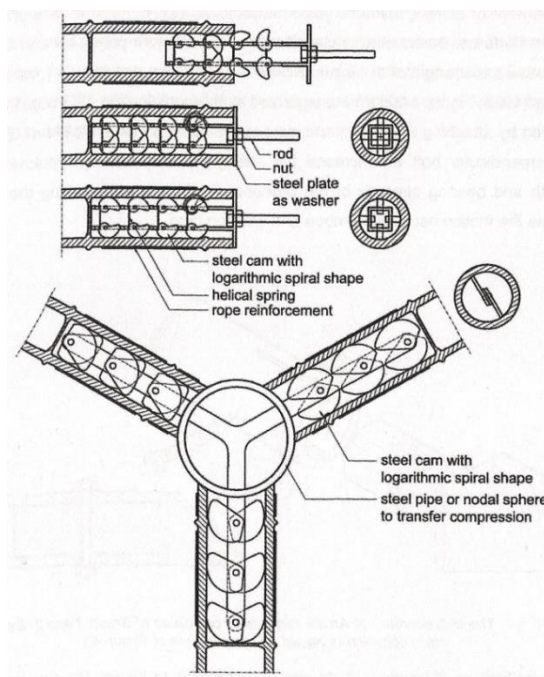


Figura 53 – Adaptação do sistema de montanhismo às ligações de bambu - (cit. Widyowijatnoko, A., 2012)

Outra ligação desenvolvida pelo autor é uma melhoria da proposta por Nienhuys, Figura 32 vista no grupo 2. Esta passa a pertencer a esta combinação de grupos por transformar as forças de tração em forças de compressão radial pelo interior do bambu, que é novamente a inversão do grupo 6. Como se pode ver na Figura 54, é utilizado um cilindro cônico de madeira, com um buraco para passar um parafuso. Esta peça encaixa na perfeição por dentro de outra peça de madeira cônica dividida em 4 partes. O parafuso transmite as forças de tração para a peça de madeira que está encaixada por dentro da outra peça, sendo puxada para fora da cana. Como as outras 4 peças têm uma conicidade invertida relativamente à primeira, as 4 peças são empurradas contra as paredes interiores da cana quando esta última é puxada paralela às fibras fora. Desta maneira, o atrito do conjunto aumenta significativamente, e por funcionar por atrito faz com que pertença ao grupo 2. Para este caso são também necessárias cordas no exterior da cana para evitar que se abram fendas. Para diferentes diâmetros de bambu as peças de madeira devem ser ajustadas de modo a ter uma curvatura compatível. A retração do bambu e da madeira deve ser tida em consideração para ligações a longo prazo, uma vez que o atrito é afetado por este fenómeno. Por outro lado, a retração é menor se forem utilizadas peças com teores em humidade relativamente baixos. Para transmitir esforços de compressão o princípio do grupo 1 pode ser utilizado.

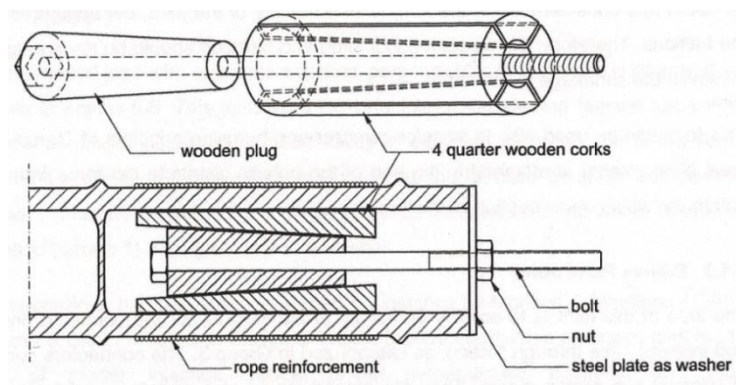


Figura 54 – Modificação da ligação por Nienhuys - (Widyowijatnoko, A., 2012)

Outra ligação que tira partido do interior do bambu, também proposta por Widyowijatnoko, A. (2012), utiliza duas placas elipsoidais metálicas que se introduzem dentro da cavidade do bambu. Estas peças são introduzidas dentro da cavidade do bambu com determinado ângulo que permita o seu encaixe perfeito dentro da cana. Cada uma tem dois furos por onde passam dois parafusos que vêm até fora do bambu, em que cada parafuso tem uma porca. Quando o parafuso é tracionado, ou seja, puxado para fora da cana, a porca empurra a respetiva placa que está em contacto com a parede interior do bambu, introduzindo esforços de compressão radial pelo interior da cana, funcionando novamente por atrito. A configuração pode-se ver na Figura 55. Para evitar a abertura de fendas é preciso utilizar cordas pelo exterior da cana.

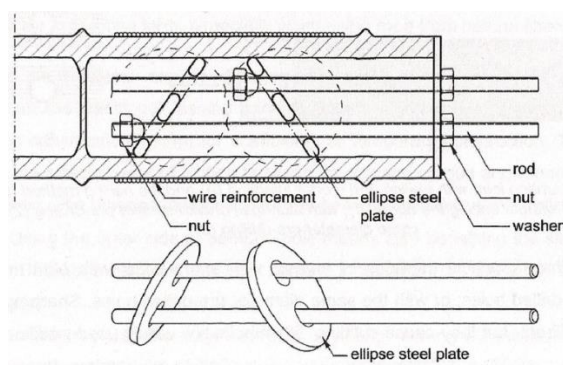


Figura 55 – Ligação proposta por Widyowijatnoko, A. (2012)

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Depois de analisar as diferentes ligações pode-se concluir que é preferível utilizar a ligação do grupo 6 proposta por Widyowijatnoko, A. (2012) para esforços de tração uma vez que esta ligação amarrada possui uma configuração que permite que a rotura se dê por uma peça metálica (parafuso), tornando fácil a previsão da sua resistência e o seu dimensionamento.

Para esforços de compressão as ligações do grupo 1 são as mais eficientes e as mais resistentes, sendo por isso aconselhadas para estes esforços.

Embora já existam muitas e diferentes maneiras de ligar canas de bambu, a pesquisa de novas soluções é necessária. A evolução das ligações de bambu é fundamental para o uso eficiente do mesmo material, e isso é fundamental para a sua aceitação como um material de construção corrente.

5

NORMAS

Uma estrutura deve ser dimensionada e construída de tal maneira que tenha um adequado comportamento de suporte às ações para que foi dimensionada, ou seja, tem de ser projetada com um coeficiente de segurança apropriado. E isto tem de ser válido durante a construção e a vida útil da estrutura, tendo em atenção os fatores económicos e de durabilidade para os quais foi construída. Por isso, o seu dimensionamento deve ser baseado em cálculos, que assegurem que nenhum estado limite é ultrapassado. E daí a necessidade da existência de normas que regulamentem a segurança estrutural e que permitam assumir responsabilidades legalmente enquadradas.

E assim, depois de descrever o muito que tem sido feito com vista a conhecer as propriedades mecânicas do bambu, de modo a permitir dar sensibilidade a quem projeta, apresentam-se agora as normas que podem orientar um adequado dimensionamento estrutural com a utilização do bambu.

A primeira norma sobre o bambu, “Indian Standard 6874”, surgiu em 1973, e embora antes desta data se tivessem já feito muitos ensaios ao material, havia uma grande dispersão de resultados, sendo que cada investigador definia os seus critérios e desenvolvia as suas técnicas de análise, o que tornava a comparação de resultados bastante difícil. Esta norma veio por isso permitir que o bambu pudesse ser utilizado na construção de forma sistemática, fazendo frente a outros materiais e com diferentes variáveis.

Depois disso, nas últimas décadas, tem havido uma grande evolução nos estudos feitos sobre o bambu como material estrutural, levando ao desenvolvimento de uma grande vontade e interesse na publicação de normas internacionais. E foi assim que, em 2004, foi lançada pela ISO - “International Organization for Standardization”- o documento ISO 22156 – “Bamboo Structural Design” em conjunto com um documento que especifica como devem ser determinadas as propriedades físicas e mecânicas do bambu - ISO 22157:1 - e um manual para o laboratório - ISO 22157:2. O pedido tinha dado entrada na INBAR (“International Network for Bamboo and Rattan”) e em 2001 tinham sido lançadas as pré-normas (ISO, 2001c), (ISO, 2001a) e (ISO, 2001b).

Paralelamente, em países onde o bambu é estruturalmente utilizado com frequência, como na Índia (Standards, B.o.I., 2009), Peru (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012) e Colômbia (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012), foram sendo desenvolvidas normas nacionais, permanecendo ainda hoje a ISO como a única internacional. E como seria de esperar, as mais recentes edições das normas destes países têm já uma grande analogia com a ISO. Em particular, a norma indiana, embora não cubra os estados limites de dimensionamento, tem aspetos gerais e recomendações que são relevantes para o dimensionamento de edifícios em bambu, tendo em conta a resistência mecânica e a durabilidade das estruturas.

Balizando as exigências da ISO (2001c) em termos de adoção de soluções construtivas, esta permite que técnicas tradicionais se mantenham, como alternativas às suas recomendações, caso tenham tido um bom funcionamento em situações de, por exemplo, um furacão ou sismo, ou caso tenham provado ter melhores resultados que as suas especificações.

Já as normas Colombiana e Peruana focam-se especialmente na espécie “*Guadua*”, e permitem que se façam analogias e adaptações às opções tomadas para utilização em outras espécies. E para além de citarem a ISO baseiam-se nela e não são muito diferentes desta.

Este capítulo pretende assim, ser um compêndio dos regulamentos referidos acima que poderão servir de base de estudo a quem quiser dimensionar estruturas em bambu.

5.1 MATERIAL

A ISO é uma norma genérica que não referencia espécies de bambu em especial.

Ao contrário da ISO, a norma indiana (Standards, B.o.I., 2009) faz referência ao material que se deve usar. Bambus com menos de 4 anos não devem ser utilizados, e deve-se esperar pelo menos 6 semanas, depois do seu corte, para que estejam curados. Para além disso, o bambu deve ser tratado adequadamente.

Esta norma escolhe 16 das mais de 100 espécies de bambu existentes na Índia, sendo as mais abundantes no país e simultaneamente as recomendadas para a construção. Estas foram separadas em 3 grupos diferentes, conforme a sua resistência à flexão, o seu módulo de elasticidade à flexão e a sua resistência máxima à compressão, com as canas ainda verdes.

Tabela 21 – Divisão das espécies por resistência - (Standards, B.o.I., 2009)

Norma Indiana	Flexão (R) (MPa)	E. Flexão (E) (GPa)	Compressão (C) (MPa)
Grupo A	$R > 70$	$E > 9$	$C > 35$
Grupo B	$70 > R > 50$	$9 > E > 6$	$35 > C > 30$
Grupo C	$50 > R > 30$	$6 > E > 3$	$30 > C > 25$

Esta é sem dúvida uma boa abordagem, uma vez que ao distinguir as peças de bambu em termos de resistência, enquadra, de forma fácil, a sua utilização na construção.

A norma Peruana (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012) vai mais longe, pois além de fazer referência aos materiais que podem ser utilizados em construções de bambu, refere quais as especificações que os materiais acessórios - como madeira, elementos metálicos e de betão armado – deverão ter para serem utilizados em conjunto com o bambu. A título de exemplo, define que a argamassa de cimento, que venha a ser utilizada para o enchimento dos entrenós, seja feita com o traço 1:4 (cimento: areia grossa) e exige o cumprimento dos regulamentos Peruanos do mesmo material.

5.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

5.2.1 ESTADOS LIMITES

Como em qualquer regulamento, os regulamentos de estruturas em bambu não permitem que os valores para os quais a estrutura vai estar sujeita excedam os valores de estado limite, sendo que os estados limites estão associados à situação para a qual a estrutura deixa de satisfazer os requisitos de dimensionamento.

Pode-se dividir os estados limites em estados limites últimos e em estados limite de serviço. O primeiro está associado com o colapso ou com outras formas de falha estrutural que possa pôr em risco a segurança de pessoas. Este inclui a perda de equilíbrio da estrutura ou parte dela, e também a falha por deformação excessiva causando rotura ou perda de estabilidade da estrutura ou parte dela. Os estados limites de serviço são atingidos quando qualquer critério de serviço deixa de ser cumprido. Esses critérios incluem a deformação ou flecha excessivas que afetem visual ou fisicamente o uso eficiente da estrutura, ou causem danos em elementos não estruturais que induzam o seu mau funcionamento relativo ao fim para o qual se destina. A vibração que cause desconforto a pessoas está também incluído neste último. (ISO, 2001c)

5.2.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL

De acordo com a ISO (2001c) – “Bamboo Structural Design”, o estudo estatístico das características mecânicas do material pode ser feito através da equação (2), que permite que se determinem os respectivos valores característicos.

$$R_k = R_{0,05} * \left(1 - \frac{\left(2,7 * \left(\frac{s}{m} \right) \right)}{\sqrt{n}} \right) \quad (2)$$

Sendo que:

R_k - Valor Característico;

$R_{0,05}$ – 5º percentil dos valores dos ensaios

m – Média dos valores dos ensaios

s – Desvio padrão dos ensaios

n – Número de ensaios realizados (Mínimo 10)

Já a norma Indiana refere na tabela abaixo os resultados dos ensaios que foram feitos com as 16 espécies escolhidas para determinar as resistências últimas das propriedades de cada uma (Standards, B.o.I., 2009).

Tabela 22 – Características mecânicas de 16 espécies - (cit. Standards, B.o.I., 2009)

SI No.	Species	Properties							
		In Green Condition				In Air Dry Conditions			
		Density	Modulus of Rupture	Modulus of Elasticity	Maximum Compressive Strength	Density	Modulus of Rupture	Modulus of Elasticity	Maximum Compressive Strength
		Kg/m ³	N/mm ²	x 10 ³ N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	N/mm ²	10 ³ N/mm ²	N/mm ²
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1.	<i>Bambusa auriculata</i>	594	65.1	15.01	36.7	670	89.1	21.41	54.3
2.	<i>B.balcooa</i>	783	65.4	7.31	46.7	-	-	-	-
3.	<i>B.bambos</i> (Syn. <i>B. arundinacea</i>)	559	58.3	5.95	35.3	663	80.1	8.96	53.4
4.	<i>B.burmanica</i>	570	59.7	11.01	39.9	672	105.0	17.81	65.2
5.	<i>B.glaucescens</i> (Syn. <i>B. nana</i>)	691	82.8	14.77	53.9	-	-	-	-
6.	<i>B.nutans</i>	603	52.9	6.62	45.6	673	52.4	10.72	47.9
7.	<i>B.pallida</i>	731	55.2	12.90	54.0	-	-	-	-
8.	<i>B.tulda</i>	658	51.1	7.98	40.7	722	66.7	10.07	68.0
9.	<i>B.ventricosa</i>	626	34.1	3.38	36.1	-	-	-	-
10.	<i>B.vulgaris</i>	626	41.5	2.87	38.6	-	-	-	-
11.	<i>Cephalostachyum pergracile</i>	601	52.6	11.16	36.7	640	71.3	19.22	49.4
12.	<i>D.longispathus</i>	711	33.1	5.51	42.1	684	47.8	6.06	61.1
13.	<i>D.strictus</i>	631	73.4	11.98	35.9	728	119.1	15.00	69.1
14.	<i>Melocanna baccifera</i>	817	53.2	11.39	53.8	751	57.6	12.93	69.9
15.	<i>Oxytenanthera abyssinica</i>	688	83.6	14.96	46.6	-	-	-	-
16.	<i>Thyrsostachys oliveri</i>	733	61.9	9.72	46.9	758	90.0	12.15	58.0
NOTES 1 As the strength of split bamboo is more than that of round bamboo, the results of tests on round bamboo can be safely used for designing with split bamboo. 2 The values of stress in N/mm ² have been obtained by converting the values in kgf/cm ² by dividing the same by 10.									

O regulamento Colombiano (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012) para chegar aos valores característicos adota a mesma equação e exige, para garantir maior fiabilidade, que, para os valores obtidos nos ensaios, seja fornecido o nome do laboratório que realizou os ensaios, a ficha de realização dos ensaios, a descrição dos equipamentos usados, o número de ensaios realizados, e o profissional responsável pelos ensaios.

As normas Peruana e Indiana não se pronunciam sobre os valores característicos.

Tendo em conta que o bambu tem um comportamento linear elástico até à rotura, ou seja, que o comportamento plástico não é significativo, a ISO refere ainda que, no cálculo do comportamento de serviço da estrutura, fatores como a humidade relativa e a temperaturas das regiões, têm de ser tidos em conta, pois afetam não só a durabilidade mas também as propriedades mecânicas do material.

5.2.3 REQUISITOS DE DESEMPENHO

Segundo a ISO, todos os cenários de ações e cargas atuantes, assim como os estados limites relevantes e os seus fatores de segurança, devem ser consideradas de acordo com o regulamento do país onde se vai realizar a obra (no caso de Portugal, o Eurocódigo (EC)), ou seja, durante toda a sua vida útil a estrutura tem de aguentar as cargas para qual foi dimensionada.

Já o Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P. (2012) refere a importância, unicamente para as cargas permanentes, dos incrementos de deformação com o tempo (fluência). E as deformações máximas têm de ser respeitadas nas diversas combinações das ações de serviço.

Esta norma permite uma adoção de um método simplificado para determinação das forças de corte atuantes devido ao sismo e ao vento para edifícios, até dois pisos de altura:

- Vento: Para determinar as forças cortantes devido à ação do vento, deve-se multiplicar em cada direção a área projetada pelos seguintes coeficientes:
 - Estruturas de 1 piso: 21 kg/m² de área projetada.
 - Estruturas de 2 pisos:
 - Segundo piso: 21 kg/m² de área projetada de segundo piso.
 - Primeiro piso: 21kg/m² de área total projetada.
- Sismo: Para coberturas leves, tais como cartão betuminoso, chapas de fibrocimento, calamina, etc. pode-se utilizar os seguintes valores que devem ser multiplicados pela área coberta da edificação:
 - Estruturas de 1 piso: 10,7 kg/m² de área coberta.
 - Estruturas de 2 pisos:
 - Segundo piso: 16,1 kg/m² de cobertura correspondente ao segundo piso.
 - Primeiro piso: 16,1 kg/m² de área total coberta.
- Sismo: Para coberturas pesadas com telhas ou semelhante devem-se adotar os seguintes valores:
 - Estruturas de 1 piso: 29,5 kg/m² de área coberta.
 - Estruturas de 2 pisos:
 - Segundo piso: 29,8 kg/m² de cobertura correspondente ao segundo piso.
 - Primeiro piso: 22 kg/m² de área total coberta.

Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012) alerta para que, quando o bambu for utilizado em coberturas de piscina ou noutro local exposto a cloro, se devem tomar as devidas precauções para evitar a deterioração do material.

5.2.4 TENSÕES ADMISSÍVEIS

5.2.4.1 Abordagem da ISO (2001c)

Em vez de se utilizarem os estados limites últimos, para cálculo da solução final, a ISO (2001c) permite que se utilize a “tensão admissível”, a partir da seguinte expressão:

$$\sigma_{all} = \frac{R_k * G * D}{S} \quad (3)$$

Sendo que:

σ_{all} – Tensão admissível (do inglês: allowed)

R_k - Valor característico da tensão calculada

G – Fator que tem em conta a diferença entre os resultados alcançados no laboratório e a prática; Por defeito 0,5.

D – Fator que tem em conta a duração da carga: 1,0 para carga permanente; 1,25 para carga permanente + carga temporária; 1,5 para anteriores + a ação do vento;

S – Fator de segurança; Por defeito 2,25.

Nota: Para um desvio padrão de 15% e uma carga permanente, a tensão admissível é 1/7 do valor médio da sua resistência última.

5.2.4.2 Abordagem Indiana

A norma indiana (Standards, B.o.I., 2009) também determina qual é a tensão admissível que se pode utilizar para cada espécie. Propõe os mesmos valores que a ISO para os fatores que têm em conta a duração da carga, (“D” da equação (3)), e para os fatores de segurança dos resultados obtidos em laboratório (S/G) propõe valores de 4 para a resistência à flexão, de 4,5 para o módulo de elasticidade, e de 3,5 para a resistência à compressão. Na tabela abaixo os valores apresentados são relativos a valores médios, e não a valores característicos, e com ao bambu ainda verde. Como se viu no capítulo 3, o bambu seco é mais resistente do que o verde, sendo seguro a utilização dos valores da Tabela 23.

Tabela 23 – Agrupamento das 16 espécies (cit. Standards, B.o.I., 2009)

SI No.	Species	Extreme fibre stress in bending N/mm ² (3)	Modulus of elasticity 10 ³ N/mm ² (4)	Allowable compressive stress N/mm ² (5)
(1)				
	GROUP A			
1.	<i>Bambusa glaucescens (syn.B.nana)</i>	20.7	3.28	15.4
2.	<i>Dendrocalamus strictus</i>	18.4	2.66	10.3
3.	<i>Oxytenanthera abyssinica</i>	20.9	3.31	13.3
	GROUP B			
4.	<i>Bambusa balcooa</i>	16.4	1.62	13.3
5.	<i>B.pallida</i>	13.8	2.87	15.4
6.	<i>B.nutans</i>	13.2	1.47	13.0
7.	<i>B.tulda</i>	12.8	1.77	11.6
8.	<i>B.auriculata</i>	16.3	3.34	10.5
9.	<i>B.burmanica</i>	14.9	2.45	11.4
10.	<i>Cephalostachyum pergracile</i>	13.2	2.48	10.5
11.	<i>Melocanna baccifera (Syn.M.bambusoides)</i>	13.3	2.53	15.4
12.	<i>Thyrsotachys oliveri</i>	15.5	2.16	13.4
	GROUP C			
13.	<i>Bambusa arundinacea (Syn.B.bambos)</i>	14.6	1.32	10.1
14.	<i>B.ventricosa</i>	8.5	0.75	10.3
15.	<i>B.vulgaris</i>	10.4	0.64	11.0
16.	<i>Dendrocalamus longispathus</i>	8.3	1.22	12.0
NOTE - The values of stress in N/mm ² have been obtained by converting the values in kgf/cm ² by dividing the same by 10.				
¹⁾ The values given pertain to testing of bamboo in green condition.				

5.2.4.3 Abordagem Colombiana

A Norma Colombiana aborda simultaneamente as estruturas de bambu e de madeira. Relativamente ao bambu, para os esforços admissíveis, a norma Colombiana propõe uma expressão igual à proposta pela ISO. Os coeficientes condicionantes estão dispostos na seguinte tabela.

Tabela 24 – Coeficientes de fatores condicionantes - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Fator	Flexão	Tração	Compressão	Compressão ⊥	Corte
G	-	0,5	-	-	0,6
S	2,0	2,0	1,5	1,8	1,8
D	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1

E a partir destes coeficientes refere que para a espécie *Guadua* os valores para os esforços admissíveis em MPa e para um teor em humidade de 12%, são os seguintes:

Tabela 25 – Esforços admissíveis - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Flexão (MPa)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Compressão ⊥ (MPa)	Corte (MPa)
15	18	14	1,4	1,2
compressão paralela do eixo longitudinal. ⊥ compressão perpendicular do eixo longitudinal.				

Já relativamente ao módulo de elasticidade referem 3 diferentes valores para se utilizar em situações distintas. Para a análise de elementos estruturais deve-se utilizar o $E_{0,5}$, para calcular os coeficientes de estabilidade de vigas (C_L) e de pilares (C_p), explicados mais à frente, o E_{min} e o $E_{0,05}$ deve ser utilizado para o cálculo das flechas quando as condições de serviço sejam críticas ou seja requerido um nível de segurança superior ao normal. De qualquer modo, deixa a escolha do módulo de elasticidade a ser utilizado ao critério do engenheiro projetista.

Tabela 26 – Módulo de Elasticidade admissível - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Módulo de Elasticidade (E.) (GPa)		
E. Médio ($E_{0,5}$)	E. 5ºpercentil ($E_{0,05}$)	E_{min}
9500	7500	4000

Para além disso, estes valores propostos pela norma (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012) são valores de base, sujeitos a vários fatores de modificação, apresentando a seguinte equação que chega a um valor de tensão admissível modificado que tem em conta esses fatores.

$$\sigma'_{all,i} = \sigma_{all} * C_D * C_m * C_t * C_L * C_F * C_r * C_p * C_c \quad (4)$$

Sendo que:

σ'_{all} - Tensão admissível modificada

C_D - Coeficiente de modificação devido à duração de carga

C_m - Coeficiente de modificação devido ao teor em humidade

C_t - Coeficiente de modificação devido à temperatura

C_L - Coeficiente de modificação de à estabilidade lateral de vigas

C_F - Coeficiente de modificação de forma (aplicável apenas à madeira)

C_r - Coeficiente de modificação de redistribuição de cargas e ação conjunta

C_p - Coeficiente de modificação da estabilidade de pilares (aplicável apenas à madeira)

C_c - Coeficiente de modificação devido ao corte

Nota: Para os vários módulos de elasticidade também se aplicam vários coeficientes de modificação, sendo que os coeficientes de modificação C_F e C_p se aplicam apenas às estruturas de madeira. A fórmula é generalizada para o regulamento todo, sendo que em alguns capítulos dedicados à madeira e noutros ao bambu.

Para o coeficiente de modificação devido à duração da carga (C_D) pode consultar-se a tabela abaixo, sendo certo que não se podem acumular os diferentes valores. Caso haja combinação de cargas o dimensionamento deve ser feito para o caso mais condicionante.

Tabela 27 – Coeficiente de modificação C_D - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Duração de carga	Flexão	Tração	Compressão	Compressão \perp	Corte	Carga de projeto
Permanente	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	Peso
Dez anos	1	1	1	0,9	1	Sobrecarga
Dois meses	1,15	1,15	1,15	0,9	1,15	Construção
7 dias	1,25	1,25	1,25	0,9	1,25	
Dez minutos	1,6	1,6	1,6	0,9	1,6	Vento e sismo
Impacto	2	2	2	0,9	2	Impacto

Já quanto ao coeficiente de modificação devido ao teor de humidade, tal como a madeira, o bambu perde resistência e rigidez com o aumento do teor em humidade. Ambos são materiais higroscópicos que absorvem humidade do meio em que estão até atingirem o equilíbrio. O teor em humidade (T.H.) do bambu é regulado pela humidade relativa do ar. Se esta última se alterar, o T.H. do bambu também se altera até atingir novamente o equilíbrio entre a sua humidade e a do ar. Por isso, deve-se fazer um ajuste quando a humidade relativa do local da construção for tal que o equilíbrio do teor em humidade do bambu seja superior a 12%. Os valores a utilizar para o coeficiente de modificação devido ao teor em humidade (C_m) estão na tabela abaixo.

Tabela 28 – Coeficiente de modificação C_m - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Esforços	TH≤12%	TH=13%	TH=14%	TH=15%	TH=16%	TH=17%	TH=18%	TH≥19%
Flexão	1	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,7
Tração	1	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,8
Compressão	1	0,96	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,7
Compressão \perp	1	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,8
Corte	1	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,8
E	$\frac{E_{0,5}}{E_{0,05}}$ E_{min}	1	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,9

O valor de equilíbrio depende também da temperatura. O regulamento fornece uma tabela com as várias humidades relativas de cada cidade da Colômbia e com o devido T.H. do bambu equilibrado com essas humidades relativas. Tal pode ser feito para cada país facilitando o trabalho aos projetistas. A seguinte figura permite obter o valor do T.H. de equilíbrio da madeira com as temperaturas e humidades relativas do ambiente. A norma permite que se use esta tabela para o bambu.

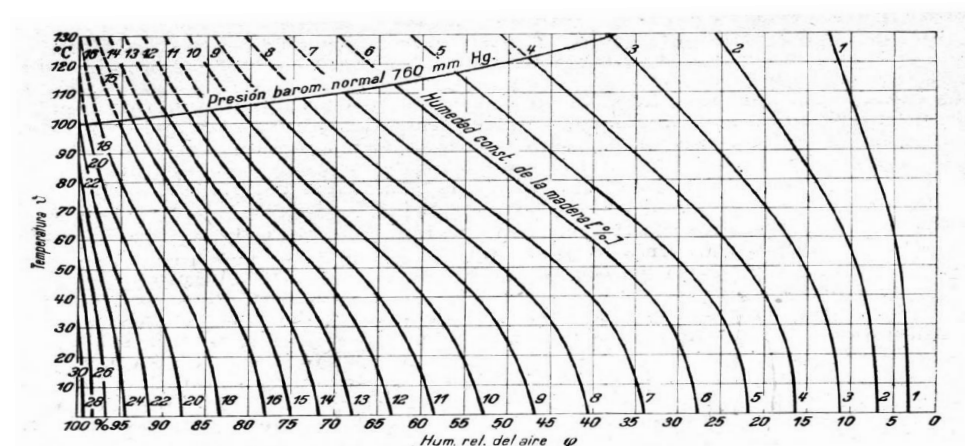


Figura 56 – Teor em humidade a partir da Temperatura e Humidade Relativa do ar (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Quando os elementos de bambu estão submetidos a temperaturas altas, o valor das tensões admissíveis também tem de ser alterado pelo C_t , de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 29 – Coeficiente de modificação C_t - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Esforços	Condições de serviço	(C_t)		
		$T \leq 37^\circ\text{C}$	$37^\circ\text{C} \leq T \leq 52^\circ\text{C}$	$52^\circ\text{C} \leq T \leq 65^\circ\text{C}$
Flexão	Húmido	1	0,6	0,4
	Seco		0,85	0,6
Tração	Húmido		0,85	0,8
	Seco		0,9	
Compressão II	Húmido		0,65	0,4
	Seco		0,8	0,6
Compressão \perp	Húmido		0,8	0,5
	Seco		0,9	0,7
Corte	Húmido		0,65	0,4
	Seco		0,8	0,6
E	Húmido		0,8	0,8
	Seco		0,9	

Caso se utilizem 4 ou mais elementos de igual rigidez para vigas ou pilares em pórticos ou treliças com distância entre elementos inferior a 0,60 m pode-se utilizar $C_r = 1,1$.

Os restantes coeficientes estão inseridos nos subcapítulos correspondentes aos esforços em questão. C_c e C_L estão na parte de esforços de flexão, enquanto os restantes coeficientes de modificação C_F e C_p se aplicam apenas às estruturas de madeira.

5.2.4.4 Abordagem Peruana

A abordagem da norma Peruana (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012) é diferente da anterior. Utiliza valores mais baixos para os esforços admissíveis, permitindo apenas um acréscimo nos esforços de compressão perpendicular em 0,1 MPa relativamente à Colombiana.

Tabela 30 – Esforços admissíveis - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Flexão (MPa)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Compressão \perp (MPa)	Corte (MPa)
5	16	13	1	1,3

Esta norma adota também coeficientes de modificação, embora não dependa de tantos fatores. Só considera os coeficientes C_D , C_L e C_r , sendo que o primeiro só toma os valores de 0,9 ou 1,0 para as situações de carga permanente e carga variável respetivamente. O segundo (C_L) obtém-se exatamente da mesma maneira que na norma Colombiana (podendo consultar-se o método de cálculo para o seu valor no subcapítulo relativo às vigas). Já o terceiro (C_r) toma exatamente o mesmo valor que na norma Colombiana.

Quanto ao módulo de elasticidade adota valores um pouco diferentes da norma Colombiana sujeitando-os também aos fatores de modificação, sendo os valores admissíveis sugeridos, os seguintes:

Tabela 31 – Módulo de Elasticidade - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Módulo de elasticidade (GPa)	
$E_{0,5}$	E_{min}
9500	7300

5.2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A norma ISO (2001c) prevê certas considerações sobre a geometria das canas de bambu:

- São analisadas como tubos ocos com espessura variável
- São analisadas como não sendo membros perfeitamente retos
- São analisados como sendo afuniladas
- Devem ser utilizados métodos convencionais de análise estrutural para definir a curvatura inicial, diâmetro e espessura dos elementos
- Os entrenós não têm comprimentos iguais

- É preferível que as ligações sejam feitas perto dos nós
- As ligações devem ser sempre consideradas como rótulas, a não ser que haja justificação para ser considerada uma mola ou um apoio fixo.
- A conicidade não deve ser inferior a 1:170, ou seja, $\frac{D-d}{L} \geq \frac{1}{170}$, sendo “D” o diâmetro exterior, “d” o diâmetro interior, e “L” o comprimento do elemento.

Já a Standards, B.o.I. (2009) acrescenta:

- A curvatura máxima admissível é de 75 mm num comprimento de 6 metros.
- As peças poderão ser utilizadas quando seu teor em humidade for inferior a 20%, sendo favorável valores menores.
- Ao contrário da madeira, as propriedades do bambu não são constantes dentro da mesma espécie, sendo dependente de outros fatores, como a sua origem geográfica, posição ao longo da cana, e idade, etc.. Daí a exigência de se utilizarem fatores de segurança elevados.
- Embora o bambu resista bem a esforços de flexão, os esforços axiais são preferíveis, pelo que recomenda o uso de estruturas treliçadas.

Já o Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P. (2012) e o Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012) acrescentam:

- O teor em humidade do bambu deve estar entre 10 e 19% e o mais próximo possível do ponto de equilíbrio com a humidade relativa do local onde vai ser utilizado de maneira a ter pouca variação de volume.
- O bambu deve estar protegido da humidade e da radiação solar.
- Só é permitida uma curvatura de 0,33% (20 mm em 6 metros). Para calcular a curvatura deitam-se as peças em cima de uma superfície plana e mede-se o afastamento desta à peça.
- E para a conicidade permitem valores de 1% (1:100).

5.2.6 VIGAS (PREDOMINANTEMENTE À FLEXÃO)

O valor do momento máximo a que o elemento estiver sujeito deve ser comparado com os valores de estado limite último ou de tensão admissível, usando as ações previstas no regulamento local. No caso do EC, a deformação deve ser calculada e comparada com os valores admissíveis, tendo em consideração a curvatura inicial. O cálculo do corte tem de ser considerado se o comprimento da viga for menor que 25x o diâmetro, sendo que só para esta gama de comprimentos é que o corte pode ser condicionante. A interação da flexão com esforço axial deve ser considerada se for o caso de haver esforços axiais importantes. (ISO, 2001c)

A Standards, B.o.I. (2009) determina valores da resistência ao corte para 3 espécies:

Tabela 32 – Resistência última ao corte - (Standards, B.o.I., 2009)

Espécie	Corte (MPa)
Bambusa Pallida	9,77
B. vulgaris	9,44
Oxytenanthera absyssinica	11,2

A norma Colombiana (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012) refere que o bambu apresenta uma razão entre a resistência à flexão e o seu módulo de elasticidade muito alto, o que o torna um material muito flexível. Por essa razão, no dimensionamento de elementos à flexão as deformações/flechas são quase sempre condicionantes. Contudo, deve ser verificado o seu limite de resistência à flexão, corte e esmagamento, surgindo este último se houver compressão perpendicular às fibras (este costuma ser mais condicionante junto aos apoios). Caso não verifique a resistência ao esmagamento devem encher-se os entrenós com cimento.

Deve tentar-se que as cargas concentradas sejam aplicadas junto aos nós, uma vez que é a parte do bambu que resiste melhor ao corte. Embora o enchimento dos entrenós solucione o problema do corte faz com que aumente significativamente o peso próprio da estrutura, levando a um dimensionamento menos económico. Junto aos apoios não é tão gravoso, mas no caso de a carga concentrada ocorrer a meio de uma viga, terá de se arranjar soluções de reforço que serão sempre prejudiciais, devendo por isso evitar-se. Nestes casos podem utilizar-se peças metálicas o que pode ser positivo do ponto de vista do peso e menos positivo do ponto de vista económico. O projetista precisa de ter em conta o fator eficiência versus economia para optar pela melhor solução.

Para o cálculo da Inércia, a norma ISO (2001a) propõe a equação (5). Descreve que para determinar os diâmetros exteriores se deve medir a cana em duas direções perpendiculares e a espessura das paredes deve ser medida nos quatro pontos que pertencem às diagonais utilizadas para medir os diâmetros. E estas devem ser feitas para as duas extremidades da cana. No cálculo da inércia do ponto central do elemento são adotados os valores médios dos diâmetros e das espessuras das paredes, calculando-se a partir destes, a inércia.

$$I = \frac{\pi}{64} * (D^4 - (D - 2 * t)^4) \quad (5)$$

Sendo que:

I – Momento de Inércia

D – Diâmetro exterior médio

t – espessura média

Nota: este método é conservativo. Pode-se também calcular a média das inércias nas extremidades, resultando num valor superior. Para vigas compostas – com mais do que uma cana - deve-se utilizar o teorema de Steiner.

Também a norma indiana propõe uma fórmula análoga para Inércia.

E embora comecem por dizer que se deve evitar ao máximo perfurações em vigas, as normas Colombiana (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012) e Peruana (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012), prevendo essa necessidade, fazem algumas recomendações para estas situações:

- Não é permitido fazer furos à altura do eixo neutro em seções onde haja cargas pontuais ou perto dos apoios. Nessas seções só é permitido furar o bambu caso se encha o entrenó em causa com argamassa de cimento.
- Em seções diferentes das anteriores, deve-se perfurar à altura do eixo neutro, mas nunca nas zonas tracionadas da secção.

No caso de vigas compostas deve usar-se cintas, parafusos ou qualquer outro elemento, devidamente espaçados, que garantam o funcionamento de conjunto da viga (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012). O espaçamento máximo destes elementos não deve ser superior ao mínimo destes 3 valores:

- $3xh$;
- $L/4$;
- $j = \frac{7 \cdot L}{V}$, em que “V” é o esforço transversal máximo na viga.

Ainda a norma Colombiana recomenda que se encham os entrenós com cimento nos sítios onde se colocam estes conectores que são materializados por parafusos que atravessam as canas. Pode-se ver o pormenor na figura abaixo.

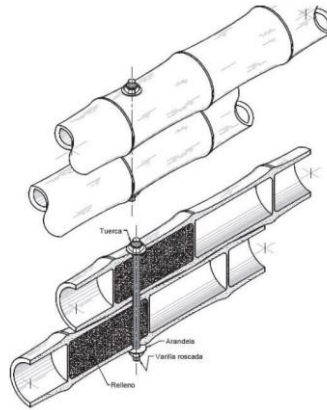


Figura 57 – Conectores de duas canas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

A utilização do cimento dentro dos entrenós tem em vista resistir aos esforços de esmagamento, e também de certa maneira travar bem os parafusos, para que a ligação entre as duas canas tenha uma maior rigidez. Por razões de peso próprio da estrutura, como já foi dito anteriormente, esta solução não é a melhor, pelo que sempre que possível se deve adotar uma solução que consiga conferir rigidez e estabilidade às peças, sem que se aumente muito o peso.

Do ponto de vista da norma Peruana, para as vigas compostas devem usar-se no mínimo 5 conectores, sendo que o espaçamento máximo entre eles é de $L/4$ (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012). Um esquema proposto pela mesma norma está detalhado na figura abaixo.

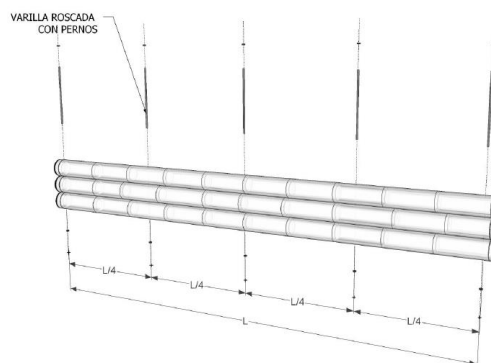


Figura 58 - Conectores de canas - (cit. Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

5.2.6.1 Flechas

Como já foi dito anteriormente, o bambu é um material muito flexível e as flechas são muitas vezes determinantes para o dimensionamento de vigas. Estas devem ser calculadas segundo a teoria elástica tradicional tendo em conta a flecha produzida pela flexão. O módulo de elasticidade a utilizar pode ser o $E'_{0,5}$, embora possa ser o $E'_{0,05}$, caso se revele necessário. (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Esta mesma norma propõe as seguintes flechas, para os diferentes tipos de estruturas.

Tabela 33 – Flechas máximas admissíveis - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Deflexiones admisibles δ (mm), nota3			
Condición de servicio	Cargas vivas (l/k)	Viento o Granizo (l/k)	Cargas totales (l/k) Nota 2
Elementos de techo / Cubiertas			
Cubiertas inclinadas			
Cielo rasos de pañete o yeso	l/360	l/360	l/240
Otros cielo rasos	l/240	l/240	l/180
Sin cielo raso	l/240	l/240	l/180
Techos planos	Nota 1	Nota 1	l/300
Techos industriales	-	-	l/200
Entrepisos			
Elementos de entepiso	l/360	-	l/240
Entrepisos rígidos	-	-	l/360
Muros exteriores			
Con acabados frágiles	-	l/240	-
Con acabados flexibles	-	l/120	-

Notas:

1. Dependiendo del tipo de cielo raso
2. Por evaluación de cargas totales, a largo plazo estas no deben invertir pendientes de drenaje en techos.
3. Considerando únicamente la deflexión inicial G.12.8.9.7

Já a norma Peruana é mais exigente nas flechas, limitando-as aos seguintes valores:

- Para cargas permanentes + sobrecarga (de serviço) em edifícios com teto raso de gesso: L/300;
- Para o mesmo carregamento para sem teto raso de gesso: L/250.
- Para o mesmo carregamento para tetos inclinados e para edificações industriais: L/250.
- Para sobrecargas (de serviço) em todo o tipo de edifícios: menor dos valores L/350 ou 13 mm.

Comparando estes valores com os do EC3 (CEN, 2010b) pode partir-se do suposto que estes limites são para a combinação frequente de ações, sendo que são parecidos.

5.2.6.2 Corte

Tal como nas normas de betão armado, a norma Colombiana permite que se calcule o corte apenas a uma distância h do apoio, exceto no caso de consolas, onde o esforço máximo de corte será calculado na face do apoio.

A tensão de corte paralela às fibras pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\sigma_v = \frac{2V}{3A} * \left(\frac{3*D^2 - 4*D*t + 4*t^2}{D^2 - 2*D*t + 2*t^2} \right) \leq \sigma'_{all,v} \quad (6)$$

Sendo que " σ_v " vem em MPa, e "V" é o esforço transversal em newtons, e as restantes medidas devem vir em milímetros. (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Ao contrário da ISO, conforme foi dito no início deste capítulo, a norma Colombiana refere que o comprimento para qual não ocorre corte é de 15x o diâmetro, em vez de 25x. Esta conclusão retira-se do facto de esta só considerar uma redução da resistência à flexão, quando o comprimento do elemento seja inferior a 15 diâmetros. A tabela com os coeficientes de modificação está disposta abaixo.

Tabela 34 – Coeficiente de modificação C_c - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

L/De	C_c
5	0,70
7	0,75
9	0,81
11	0,86
13	0,91
15	0,93

5.2.6.3 Esmagamento

Os esforços que induzem esmagamento nas canas de bambu são as cargas perpendiculares às fibras. As situações problemáticas são os picos nos diagramas de esforços transversos induzidos por uma carga concentrada no vão ou também induzido por uma reação nos apoios. No caso de cargas concentradas no vão tem de procurar-se que a área de contacto seja o maior possível. A norma Colombiana disponibiliza uma expressão que permite calcular a tensão a partir das cargas perpendiculares.

$$\sigma_p = \frac{3 \cdot R \cdot D}{2 \cdot t^2 \cdot L} \leq \sigma'_{all,p} \quad (7)$$

Em que " σ_p " é a tensão de compressão perpendicular às fibras e "R" a força aplicada no sentido perpendicular às fibras. E como já se referiu, esta norma obriga a encher os entrenós com uma argamassa de cimento sempre que uma existe uma carga perpendicular às fibras. Caso isso não se cumpra, a **tensão admissível deve ser reduzida a 1/4**.

A mesma abordagem para o esmagamento é feita pela norma Peruana.

5.2.6.4 Estabilidade Lateral

Para as vigas formadas apenas por uma cana de bambu, o coeficiente de modificação devido à estabilidade lateral de vigas é igual a 1,0, uma vez que o bambu sendo circular não fica instável lateralmente. Quando é composta, isto é, se formado por duas ou mais canas – ver Figura 59, é preciso verificar se esta requer ou não travamentos laterais na zona comprimida. O coeficiente de redução C_L tem em conta a redução da capacidade de carga dum elemento submetido à flexão devido à instabilidade lateral ou encurvadura. Segundo a norma Colombiana, caso uma viga composta esteja travada em todo o seu comprimento, $C_L = 1,0$.

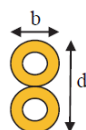


Figura 59 – Esquematização de vigas compostas - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Na seguinte tabela proposta pela norma Colombiana pode-se ver quais os fatores de redução em função das dimensões da viga.

Tabela 35 – Coeficiente de modificação CL - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

D/b	CL
1	1,00
2	0,98
3	0,95
4	0,91
5	0,87

A mesma norma Colombiana recomenda os travamentos laterais, conforme as dimensões da viga, sendo que:

- d/b=2 – não é preciso travamento lateral.
- d/b=3 – deve-se restringir os deslocamentos laterais dos apoios.
- d/b=4 – deve-se restringir lateralmente os apoios e as zonas comprimidas através de vigas.
- d/b=5 – deve haver suporte contínuo ao longo de toda a viga.

A norma fornece também as fórmulas trabalhadas para cálculo da tensão atuante devida ao momento fletor:

$$\sigma_b = \frac{M}{S} \leq \sigma'_{all,b} \quad (8)$$

Em que “M” é o momento fletor atuante e “S” é o módulo de secção (I/y). Quando se tem uma só cana calcula-se através da seguinte expressão.

$$S = \frac{\pi(D^4 - (D-2t)^4)}{32D} \quad (9)$$

Para mais do que uma cana pode-se consultar a figura abaixo.



Sección	S (mm ³)
	$\frac{\pi(5D_e^4 - 4D_e^2[D_e - 2t]^2 - [D_e - 2t]^4)}{32D_e} \quad (G.12.8-6)$
	$\frac{\pi(35D_e^4 - 4D_e^2[D_e - 2t]^2 - [D_e - 2t]^4)}{96D_e} \quad (G.12.8-7)$

Figura 60 – Módulo da Secção para vigas compostas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

A norma Peruana tem exatamente a mesma abordagem para a estabilidade lateral de vigas.

5.2.7 PILARES (ELEMENTOS SUJEITOS A ESFORÇOS AXIAIS)

Para serem utilizados como pilares devem selecionar-se as canas com menor curvatura.

Os esforços iniciais de flexão devido à curvatura e pela excentricidade devem também ser considerados. O cálculo à encurvadura deve ser de acordo com a carga crítica de Euler, reduzindo em 10% o momento de inércia para ter em conta a conicidade. Como já foi referido, a conicidade deve ser superior a 1:170. (ISO, 2001c, Standards, B.o.I., 2009)

Por outro lado, para que haja rigidez e estabilidade, devem escolher-se os bambus com maior diâmetro e maior espessura de parede. Em alternativa, pode-se utilizar associações de bambus com secções inferiores. (Standards, B.o.I., 2009)

A norma Peruana (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012) prevê que elementos de bambu utilizados para pilares que necessitem mais do que uma cana, devem ser unidos com bandas ou parafusos com espaçamentos que não excedam 1/3 da altura.

Segundo o Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012), as trações axiais são calculadas pela razão entre a força aplicada e a área da secção. Os esforços de tração perpendicular às fibras devem ser evitados, uma vez que a sua resistência é baixa. Contudo, se estes esforços estiverem presentes, devem ser resolvidos com bandas ou placas metálicas. Para esforços de compressão o cenário é diferente, uma vez que é preciso ter em conta a encurvadura.

Para o cálculo da secção útil deverá utilizar-se a seguinte expressão.

$$A = \frac{\pi}{4} * (D^2 - (D - 2t)^2) \quad (10)$$

Sendo:

A – Área de secção útil

D – Diâmetro exterior

t – espessura da parede

5.2.7.1 Comprimento de encurvadura

Para elementos à compressão define-se o comprimento efetivo medindo a distância entre dois pontos de inflexão. No caso de estruturas trianguladas, se não houver ligações especialmente rígidas nem cargas fora do plano, deve considerar-se o comprimento efetivo do seu vão (L).

Segundo a ISO (2001c), para membros contínuos com cargas laterais, mas com momentos nas extremidades de pouca importância, deve-se considerar os seguintes comprimentos:

- Nos vãos extremos – 0.8xL
- Nos vãos internos – 0.6xL
- Numa junta – 0.6x o vão maior adjacente.

Deve-se também verificar a estabilidade fora do plano.

A norma Colombiana prevê um comprimento de encurvadura diferente. Para um elemento que tenha ambos os lados articulados, o vão efetivo é de 1,0xL e para o caso do elemento ter uma extremidade encastrada e a outra livre o valor do vão efetivo é de 2,1xL. Esta norma não indica qual o valor a usar para as restantes situações. Na norma Peruana o valor para o último caso descrito é de 2,0xL.

5.2.7.2 Esbelteza

A esbelteza calcula-se de maneira tradicional: $\lambda = \frac{l_e}{r}$ em que " λ " é o coeficiente de esbelteza, " l_e " o comprimento de encurvadura, e " r " é o raio de giração. Para mais do que uma cana a expressão é $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ e para uma cana pode ser calculada pela seguinte fórmula, segundo Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012):

$$r = \frac{\sqrt{D^2 + (D - 2 * t)^2}}{4} \quad (11)$$

Conforme a esbelteza, a norma Colombiana classifica o tipo de barra, de maneira a diferenciar o tipo de esforços atuantes máximos para cada caso. Na tabela abaixo, pode-se ver essa classificação:

Tabela 36 – Esbelteza - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Barra	Esbelteza
Curta	$\lambda < 30$
Intermédia	$30 < \lambda < C_k$
Comprida	$C_k < \lambda < 150$

Em que o valor de " C_k " é calculado pela seguinte expressão:

$$C_k = 2,565 * \sqrt{\frac{E_{0.05}}{\sigma'_{all,c}}} \quad (12)$$

Até este ponto, para os elementos submetidos à compressão, a norma Peruana tem uma abordagem semelhante à Colombiana.

5.2.7.3 Esforços Máximos de compressão Permitidos

Neste parágrafo as duas normas sul-americanas propõem diferentes expressões para o cálculo das tensões máximas permitidas.

Na norma Colombiana, os esforços atuantes máximos permitidos são calculados da seguinte maneira:

- Se for uma barra curta: $\sigma_c = \frac{N}{A} \leq \sigma'_{all,c}$
- Se for uma barra intermédia: $\sigma_c = \frac{N}{A * \left(1 - \frac{2}{5} * \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^3\right)} \leq \sigma'_{all,c}$
- Se for uma barra comprida: $\sigma_c = 3,3 * \frac{E_{0.05}}{\lambda^2} \leq \sigma'_{all,c}$ - Carga crítica de Euler com um factor de segurança de aproximadamente 3.

A norma Colombiana não permite que existam elementos com uma esbelteza superior a 150.

A norma Peruana chega aos seguintes valores:

- Se for uma barra curta: $\sigma_c = \frac{N}{A} \leq \sigma'_{all,c}$ – (Igual)
- Se for uma barra intermédia: $\sigma_c = \frac{N}{A * \left(1 - \frac{1}{3} * \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^4\right)} \leq \sigma'_{all,c}$
- Se for uma barra comprida: $\sigma_c = \frac{\pi^2 * E}{2,5 * \lambda^2} \leq \sigma'_{all,c}$ – Carga crítica de Euler com F.S. de 2,5.

As duas normas podem ser utilizadas, sendo que é preferível utilizar a primeira, por prever um fator de segurança superior.

5.2.8 INTERAÇÃO DE ESFORÇOS DE FLEXÃO COM ESFORÇOS AXIAIS

As duas normas sul-americanas têm novamente a mesma abordagem. Os elementos que se encontrem simultaneamente submetidos a esforços axiais e de flexão devem respeitar a seguinte equação:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma'_{all,c}} + \frac{k_m * \sigma_b}{\sigma'_{all,b}} \leq 1 \quad (13)$$

Em que " k_m " se calcula através de:

$$k_m = \frac{1}{1 - 1,5 * \left(\frac{N_a}{N_{cr}}\right)} \quad (14)$$

E em que " N_a " é a carga axial atuante e " N_{cr} " é a carga crítica de Euler:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{0,05} * I}{l_e} \quad (15)$$

Para o caso do esforço ser de tração em vez de compressão, adota-se o fator $K_m = 1$, uma vez que não existe a possibilidade de haver instabilidade por compressão. Muda apenas os índices de "c" para "t". (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012, Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Este método de calcular a interação destes esforços é semelhante ao Eurocódigo de Estruturas Metálicas, só que neste caso a encurvadura lateral é tida em conta com os fatores de modificação " C_L " em $\sigma'_{all,b}$, e a encurvadura nos esforços de compressão é tida em conta na classificação do elemento conforme a esbelteza, que é contabilizada em $\sigma'_{all,c}$.

A interação de esforços de flexão com esforços transversos é tida em conta com o fator de redução " C_C ".

5.3 LIGAÇÕES

As ligações devem ser dimensionadas de maneira a garantir continuidade entre os elementos a ligar, cumprindo determinados limites de deformação e devem ser capazes de transmitir as forças de forma eficiente.

Para o dimensionamento das ligações, a ISO (2001c) permite que se utilizem 3 alternativas:

- Ligação completa: Consiste em dimensionar a ligação para determinada capacidade de carga. A geometria é integralmente especificada para elementos de dimensões particulares. Inclui a localização e dimensão dos elementos de cintagem. Dados para esta alternativa devem ser baseados em ensaios realizados à escala real.
- Capacidade dos componentes: Permite que a ligação seja dimensionada para uma determinada capacidade de carga de cada elemento da ligação. A capacidade de cada componente deve ser

relativa a uma dada geometria e direção da carga. Como na alternativa anterior, os dados para esta alternativa devem ser baseados em ensaios realizados à escala real.

- Princípio de dimensionamento: A mecânica básica das ligações e seus materiais deve ser especificado de tal maneira que os projetistas transmitam as bases de cálculo demonstrando que o dimensionamento foi seguro e eficiente para as geometrias e as direções de carga.

De acordo com a ISO (2001c), os ensaios ou testes podem ser efetuados de acordo com o ISO 6891 *"Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics."* Nestes, há que ter em conta que a capacidade resistente de ligações com mais do que um elemento é inferior à soma das ligações apenas com um elemento.

Em zonas propícias a desastres naturais, deve ter-se especial atenção às ligações, uma vez que, como já se viu atrás, o cálculo mais eficiente deve considerar as ligações como o elemento frágil da estrutura. Para além disso não é considerado que as ligações tenham ductilidade. (ISO, 2001c)

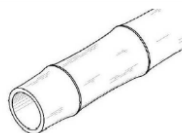
O Standards, B.o.I. (2009) propõe alguns tipos de ligações, para diferentes ângulos, fazendo apenas uma breve descrição sem grande pormenor, sendo que a utilização de ligações que já foram ensaiadas e mostraram cumprir os requisitos necessários para a estrutura em causa é adequada.

A norma Colombiana começa por dizer que as ligações têm de ser dimensionadas para que esta não falhe por tração ou por corte paralelo às fibras, não permitindo a utilização de pregos, já que estes podem abrir fendas no bambu.

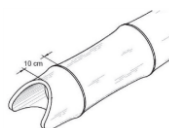
5.3.1 TIPOS DE CORTE

A norma Colombiana descreve alguns tipos de corte que se pode fazer para efetuar as ligações.

- Corte reto



- Corte de boca de peixe



- Corte pico de flauta

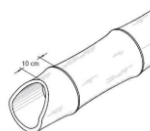


Figura 61 – Diferentes cortes - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

A norma Peruana é mais exigente na limitação das distâncias máximas entre o corte e os nós (6 cm em vez de 10 cm), e permite que se utilizem “orelhas” para cada caso, adicionando também à lista de cima o corte enviesado:

- Corte enviesado



Figura 62 – Cortes com “orelhas” - (cit. Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

5.3.2 LIGAÇÕES APARAFUSADAS – ABORDAGEM DA NORMA COLOMBIANA

As ligações aparafusadas são usadas para ligar uma ou mais canas de bambu. O aço utilizado para placas ou parafusos metálicos não deve ter uma resistência inferior a 240 MPa, a espessura das placas deve ser de pelo menos de 4,8 mm e o diâmetro mínimo dos parafusos de 9,5 mm. Os furos feitos para a utilização de parafusos devem ter um diâmetro com mais 1,5 mm do que o mesmo. Para se encher os entrenós de argamassa de cimento é feito um furo com 26 mm de diâmetro.

É permitida a utilização de abraçadeiras metálicas para complementar uma ligação, sempre que forem tomadas precauções para o esmagamento. Ver imagem abaixo.

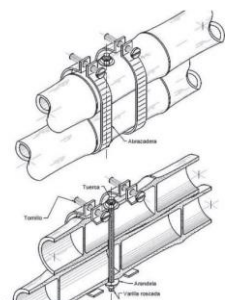


Figura 63 – Abraçadeiras para estabilizar ligações aparafusadas (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Sempre que se utilizem ligações aparafusadas deve-se usar anilhas para aumentar a área de contacto entre o bambu e o parafuso. As anilhas devem ser côncavas para acompanhar melhor a geometria do bambu. As suas dimensões estão dispostas na seguinte tabela:

Tabela 37 – Dimensões das anilhas - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Diâmetro do parafuso (mm)	9,5	12,7	15,9
Espessura das anilhas (mm)	4	5	6
Diâmetro exterior das anilhas (mm)	45	50	65

Na situação em que os parafusos têm duas zonas de corte, uma de cada lado da cana como mostra nas seguintes figuras, pode-se utilizar o procedimento descrito de seguida para determinar a carga máxima

admissível para cada ligação, conforme a direção da carga. A carga “P” tem a direção do eixo da cana, a carga “Q” tem a direção perpendicular ao eixo da cana e a carga “T” é para ligações em T.

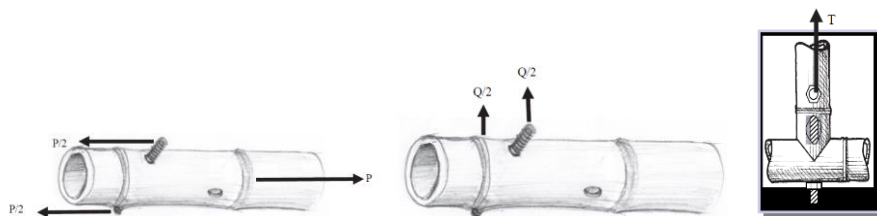


Figura 64 – Ligações aparafusadas - (cit. Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Se a carga se der numa direção intermédia entre as cargas “P” e “Q”, pode-se obter a resultante das forças através da seguinte expressão:

$$N = \frac{P*Q}{P*\sin^2 \alpha + Q*\cos^2 \alpha} \quad (16)$$

Para ligações com um só parafuso, as cargas máximas admissíveis para as diferentes direções de cargas e diferentes dimensões de parafusos podem encontrar-se na seguinte tabela, em que De é o diâmetro do bambu, #3 corresponde a um diâmetro de parafuso de 9,5 mm, #4 a 12,7 mm e #5 a 15,9 mm.

Tabela 38 – Cargas máximas admissíveis - ligações 1 parafuso - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Perno	De (mm)	P (N)	Q (N)	T (N)
#3	80	7212	2885	2000
	90	8008	3203	2100
	100	8804	3522	2200
	110	9601	3840	2300
	115	10041	4016	2400
	120	10481	4193	2500
	125	10922	4369	2600
	130	11362	4545	2700
	135	11802	4721	2800
	140	12242	4897	2900
	150	13039	5216	3000
#4	80	9710	3884	2000
	90	9916	3966	2100
	100	10943	4377	2200
	110	11970	4788	2300
	115	12521	5009	2400
	120	13072	5229	2500
	125	13623	5449	2600
	130	14174	5670	2700
	135	14725	5890	2800
	140	15276	6110	2900
	150	16303	6521	3000
#5	80	11540	4616	2000
	90	12806	5122	2100
	100	13250	5300	2200
	110	14515	5806	2300
	115	15185	6074	2400
	120	15855	6342	2500
	125	16525	6610	2600
	130	17195	6878	2700
	135	17865	7146	2800
	140	18535	7414	2900
	150	19800	7920	3000

Caso haja dois ou mais entrenós entre o parafuso e a extremidade do elemento pode-se incrementar os valores da tabela acima de 30%.

Para ligações que utilizem mais do que um parafuso é preciso multiplicar os valores da Tabela 38 por um coeficiente redutor de grupo, “Cg”. O espaçamento entre parafusos deve estar dentro do intervalo de 150 mm e 250 mm, e deve existir um entrenó entre cada um. A distância entre os parafusos e a extremidade deve ser superior a 150 mm da extremidade do elemento se estiver submetido à tração e 100 mm se estiver à compressão. Esta redução só se aplica à carga “P” e as restantes não se podem modificar. O valor de “Q” pode ser aumentado em 25% se o entrenó for preenchido com argamassa de cimento.

Tabela 39 – Coeficiente de grupo Cg - (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012)

Ligação	Número de parafusos				
	2	3	4	5	6
Ligações com bambu	1	0,97	0,93	0,89	0,82
Ligações com aço	1	0,98	0,95	0,92	0,90

Outro tipo de ligações pode ser utilizada se baseada num estudo científico com pelo menos 30 ensaios, que permita verificar que a capacidade resistente da ligação é igual ou superior às expostas acima (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).

Para os diferentes tipos de ligação descritos acima é especificado para a espécie *Guadua* a resistência de cada ligação. No caso do presente trabalho, como foi constatado no capítulo das propriedades mecânicas, a espécie *Phyllostachys pubescens* é mais resistente do que a *Guadua*, sendo conservativo a utilização destes valores.

5.3.3 LIGAÇÕES – ABORDAGEM DA NORMA PERUANA

A norma Peruana faz uma descrição muito completa das ligações entre elementos de bambu com bastante pormenor, embora não refira valores de dimensionamento.

Começa-se pelas mais simples que são feitas através de cordas e de bandas:



Figura 65 – Ligação por bandas e ligação amarrada - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

As ligações com parafusos ou as ligações com tarugos de madeira são feitos da seguinte maneira:

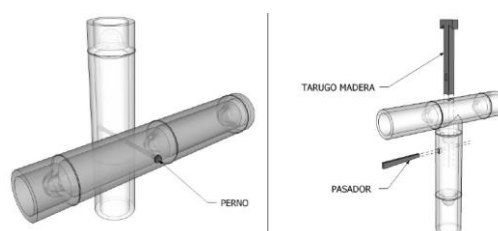


Figura 66 – Ligações Aparafusada e com tarugos de madeira - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

O processo de enchimento dos entrenós com uma argamassa de cimento é explicado na imagem que se segue. O diâmetro máximo permitido para o buraco por onde entra o cimento é de 4 cm. No orifício é injetada a argamassa através de um funil ou com ajuda de uma bomba. Como já vimos atrás este enchimento dos entrenós é muito utilizado para complementar a utilização de parafusos, garantindo uma maior capacidade de suporte à seção, apesar de aumentar o peso da estrutura.

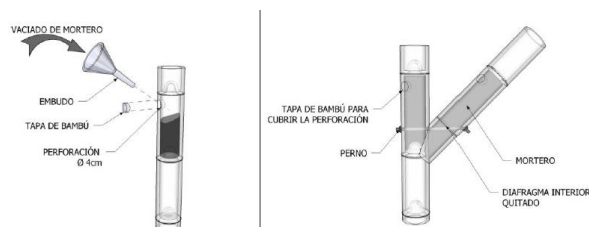


Figura 67 – Ligações aparafusadas com argamassa de cimento - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Em situações que seja necessário ligar uma cana topo a topo, os esquemas propostos são os seguintes:



Figura 68 – Ligação longitudinal – 1ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)



Figura 69 - Ligação longitudinal – 2ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

O mesmo tipo de ligação pode ser feito ainda por uma terceira opção, utilizando canas de bambu aparafusadas:

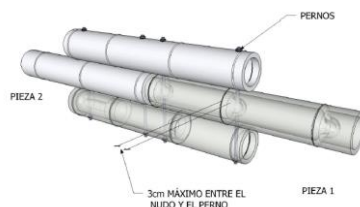


Figura 70 - Ligação longitudinal – 3ª opção - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Para estas três últimas ligações está explicitado no desenho quais são os espaçamentos das peças de ligação aos nós e, para o primeiro caso, os diafragmas são retirados, sendo descrita qual a distância que a peça de madeira (maciça) tem de ter em relação aos nós (Δ). Em ambos os casos, os parafusos a utilizar devem ter um diâmetro mínimo de 9 mm.

Para as situações de ligações perpendiculares ou diagonais têm a configuração das seguintes figuras:

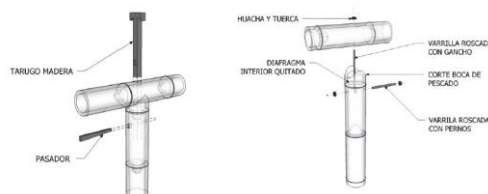


Figura 71 – Ligação perpendicular com tarugos e aparafusada - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

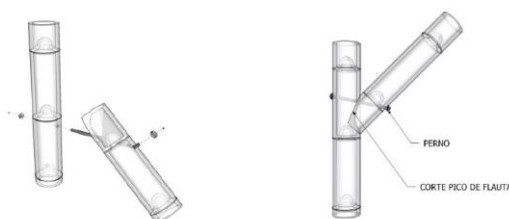


Figura 72 - Ligação diagonal simples - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

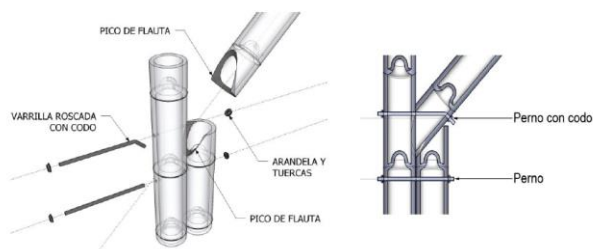


Figura 73 – Ligação diagonal com bambu de apoio - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Contudo, esta norma não especifica qual a resistência de cada ligação acima descrita. Tem apenas o objetivo de alertar ao projetista quais as configurações possíveis.

5.4 CONJUNTO DE ELEMENTOS DE BAMBU

Este subcapítulo de apresentação das normas, descreve como se devem agrupar vários elementos de bambu em conjunto, como treliças, armações, pórticos, etc..

Em primeiro lugar, deve fazer-se uma análise global dos vários elementos. As treliças devem ter em conta as excentricidades e rigidezes causadas pela assemblagem entre os vários elementos, isto é, quando as ligações dos elementos não é feita no mesmo plano é preciso ter em consideração a posição do eixo verdadeiro no método de cálculo, traduzindo-se em excentricidades e alterações da rigidez. As ligações devem ser consideradas livres de rotação no seu plano, podendo ser encastradas caso se justifique. (ISO, 2001c)

Como já foi dito anteriormente, as ligações devem ser todas consideradas como rótulas, não havendo continuidade de momentos, salvo na situação em que um elemento seja contínuo e nesse caso haverá transmissão de momentos fletores, apenas nesse elemento (ISO, 2001c, Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012).

Já em termos de dimensões, no caso de ser uma treliça triangular, que é o caso de um telhado tradicional, a altura deve exceder $0,15x$ do vão, e no caso de ser uma treliça retangular, a altura deve exceder $0,10x$ do vão.

E por outro lado, devem-se tapar as extremidades das canas para garantir uma maior durabilidade. (Standards, B.o.I., 2009)

5.5 DETALHES

A norma Peruana apresenta uma pormenorizada descrição de como devem ser feitos os diversos elementos construtivos tais como paredes, vigas e lajes, e fundações.

5.5.1 PAREDES ESTRUCTURAIS

Para paredes estruturais, a norma sugere:

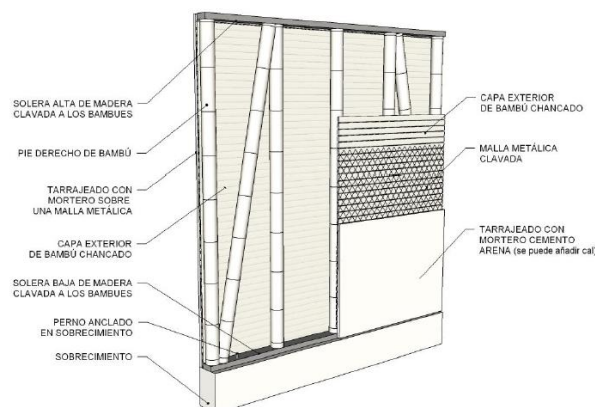


Figura 74 – Parede com soleira de madeira - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

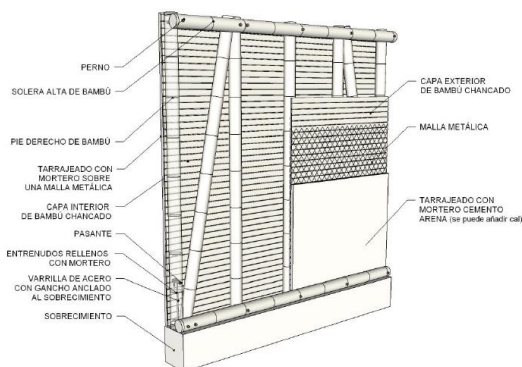


Figura 75 – Parede com soleira de bambu - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Para estes dois cenários, a norma Peruana prevê que os diâmetros do bambu não seja inferiores a 80 mm, e a distância entre os elementos verticais, na figura “Pie Derecho”, e as diagonais devem ser especificados pelo dimensionamento estrutural. Caso se utilizem soleiras de madeira, a largura mínima das tábuas deverá ter a mesma dimensão que os elementos verticais, e a sua espessura deve estar dentro do intervalo de 25-35 mm. Quando se utiliza soleiras de bambu, é preciso ter atenção o perigo de esmagamento causado pelo peso dos materiais que o sobrepõem.

Toda a estrutura está levantada do solo e pousada em cima de uma estrutura de betão (“sobrecimento”), para aumentar a durabilidade.

5.5.2 FUNDAÇÕES

Sendo as fundações os elementos estruturais que garantem a transmissão dos esforços do pilar para o solo, tem de se ter o maior cuidado no seu dimensionamento e na garantia de que têm uma duração extensa. Para assegurar esta ultima exigência, e dado que o bambu sofre degradação quando se encontra em contato com o solo, sujeito a humidades e à proliferação de fungos e outros seres vivos, tem de se assegurar o seu afastamento do solo.

Em termos de pormenor, e para garantir que as forças de tração são transmitidas corretamente constroem-se estruturas aparafusadas, em que o parafuso, paralelo às fibras longitudinais, atravessa pelo menos os seus 2 primeiros nós. No caso de o pilar ser constituído por um grupo de canas, pode dar-se o caso de ser somente necessário que uma delas esteja agarrada ao betão. E irão encher-se os entrenós atravessados pelo parafuso (“Pasador”), com argamassa de cimento, para garantir uma maior rigidez. A mesma norma Peruana propõe os seguintes detalhes:

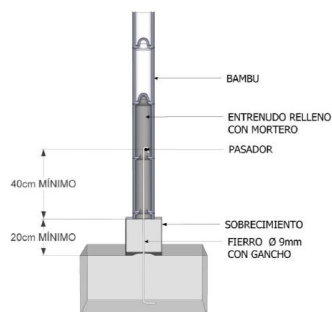


Figura 76 – Fundação 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

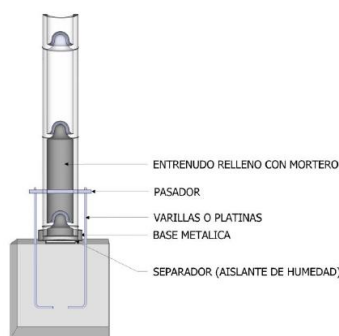


Figura 77 – Fundação 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

As dimensões do segundo detalhe são as mesmas do primeiro. No primeiro caso garante-se o afastamento da cana ao solo com o recurso de um cabeçote em betão e neste último caso com a utilização de um isolante de humidade (“Aislante”).

5.5.3 LIGAÇÕES PILAR/PAREDE – FUNDAÇÃO/TELHADO

As paredes devem estar ligadas às fundações em pelo menos 2 pontos, a uma distância que não deve ultrapassar os 2,5m. No caso de haver portas, deve estar ancorada em ambos os lados. Para soleiras de madeira essas ligações podem dar-se das seguintes maneiras:

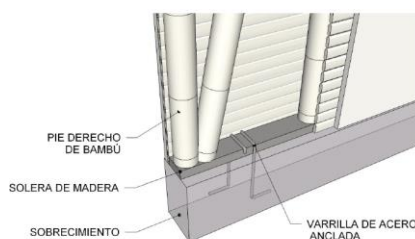


Figura 78 – Fundação de paredes tipo 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

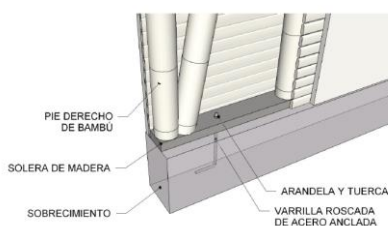


Figura 79 – Fundação de paredes tipo 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Para o caso das soleiras de bambu deve-se proceder de modo análogo às ligações dos pilares à fundação.

Nos encontros entre paredes deve-se garantir o seu funcionamento conjunto através de pelo menos 3 parafusos separados de $1/3 \times L$.

A ligação entre paredes e a cobertura deve seguir as seguintes recomendações:

- Deve existir uma viga de amarre ao nível da cobertura.
- Deve-se garantir continuidade estrutural entre a cobertura e as paredes que a suportam.
- Deve-se verificar o esmagamento do bambu.

Caso a cobertura esteja apoiada em pilares a transmissão de esforços deve ser igualmente garantida.

Os materiais utilizados na cobertura devem ser leves e devem garantir impermeabilidade suficiente para proteger os bambus da humidade. Relembra-se que o bambu não deve ter contacto com água nem deve ser exposto a radiação solar, o que se deverá ser tido em conta na escolha do material de cobertura.

5.5.4 VIGAS E LAJES

No caso de as vigas serem compostas por mais do que uma cana, a norma Peruana propõe dois esquemas possíveis, devendo esses elementos serem unidos por, mais uma vez, bandas ou parafusos. As peças de bambu em vigas compostas devem ser alternadas. Propõe a utilização de ligações com argamassa injetada para se poder aumentar o vão.

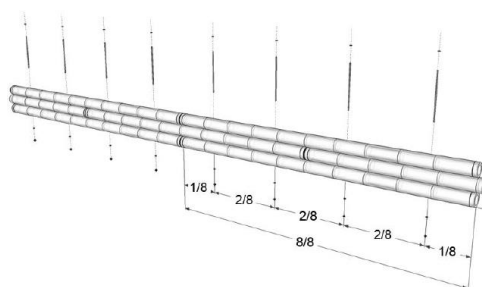


Figura 80 – Viga composta tipo A - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

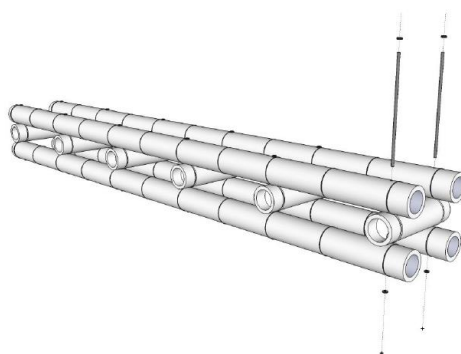


Figura 81 – Viga composta tipo B - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

Não é aconselhado utilizar lajes de betão para edifícios de bambu devido ao seu elevado peso, exceto se justifique pelo cálculo estrutural.

As lajes devem ser constituídas por elementos de bambu. Devem ser tidos em consideração alguns cuidados, como por exemplo evitar que haja esmagamento. Para evitar que tal aconteça podem-se adotar peças de madeira com a mesma curvatura que a cana para aumentar a área de contacto, ou também o enchimento dos entrenós com argamassa. Se forem utilizadas vigas compostas, deve prever-se o travamento da viga de maneira a que não haja encurvadura lateral. Para o recobrimento da laje devem ser utilizados materiais leves, com peso máximo de $1,20 \text{ kN/m}^2$, salvo se justifiquem outras soluções relacionadas com o cálculo estrutural. Para edifícios que tenham telhados rasos, deve-se facilitar a ventilação dos espaços fechados. Os detalhes das soluções apresentadas pela norma Peruana são as seguintes:

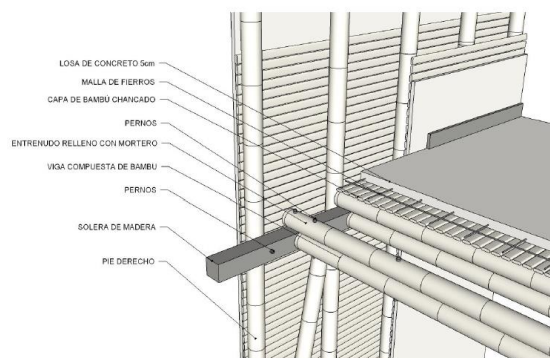


Figura 82 – Laje 1 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

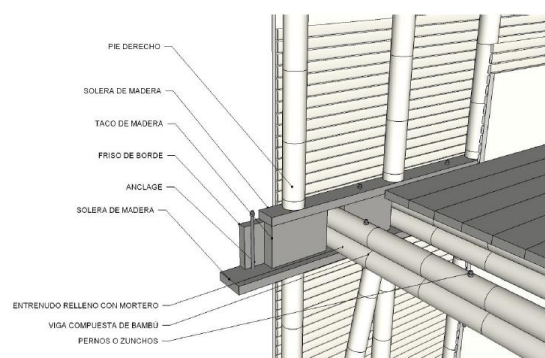


Figura 83 – Laje 2 - (Ministerio de Vivienda, C.y.S.d.P., 2012)

5.6 DURABILIDADE E PRESERVAÇÃO

O bambu deve ser tratado e deve ter uma durabilidade adequada para o fim que é usado. Contudo, é necessário ter em conta os aspetos ambientais e a saúde dos trabalhadores/utilizadores. Só devem ser utilizadas canas que sejam consideradas secas, caso contrário variações de volume podem criar esforços internos inconvenientes e possível distorção do material. Todas as peças metálicas devem estar protegidas contra a corrosão. (ISO, 2001c, Standards, B.o.I., 2009)

A resistência ao fogo deve ser determinada de acordo com o EC.

Em nenhum caso se deve utilizar estruturas de bambu em sítios que vão estar submetidos a temperaturas superiores a 65°C (Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C., 2012). Esta norma proíbe a utilização de canas de bambu que não estejam tratadas. Impõe limites para o transporte e armazenamento, para que as canas não fiquem defeituosas. Proíbe a utilização de bambu que esteja em contacto com o solo, e ao ar livre sem cobertura, e recomenda que se tenha muito cuidado com as zonas de onde se produz vapor de água, ventilando essas áreas adequadamente. Faz também uma série de recomendações para a proteção ao fogo. Para proteção de sismos também faz algumas recomendações, como por exemplo que o edifício deve ser o mais regular possível e caso haja plantas irregulares, deve ser feita uma divisão em várias plantas regulares, separadas com juntas de dilatação.

A norma Peruana faz referência a vários aspetos como instalações sanitárias, elétricas e mecânicas para a construção de edificações. A mesma norma indica como se deve proceder na manutenção do

bambu. Esta pode ser feita com materiais como ceras, lacas, vernizes ou pintura e que devem ser aplicados com os seguintes intervalos de tempo:

- Quando exposto ao ar livre, deve ser tratado no mínimo cada 6 meses.
- Quando protegido ao ar livre, deve ser tratado no mínimo cada ano.
- Quando utilizado no interior, deve ser tratado no mínimo cada 2 anos.
- Os elementos de bambu devem ser inspecionados periodicamente para identificação de alguma anomalia, e caso seja necessário deverá proceder-se à substituição dos elementos defeituosos.
- Os elementos e componentes de bambu devem ser sobredimensionados com a finalidade de garantir algum tempo extra para a resistência ao fogo.

Nos anexos desta mesma norma Peruana, estão especificados quais os tempos que diferentes compartimentos, dentro de diferentes tipos de estruturas, devem ter de resistência ao fogo. Também é especificado quanto tempo é que materiais usados na construção civil resistem ao fogo.

5.7 CLASSIFICAÇÃO

As entidades que pretendam comercializar bambu para a construção terão de cumprir determinadas regras para que possam dar garantias de qualidade do material. A classificação por diâmetros ou qualquer outra propriedade é importante para que haja uma distinção um leque de escolha para quem o utilize.

O bambu deve ser avaliado de maneira a que seja garantido o seu bom comportamento nas estruturas, e também para que se possa confiar nas propriedades como a resistência e a rigidez. A sua classificação pode ser feita por observação visual, ou qualquer outro meio não destrutivo, que terá por base as características e propriedades mais importantes para o seu funcionamento estrutural, como idade, a conicidade, a uniformidade, comprimento entre nós, o comprimento das canas e o seu diâmetro, etc..(ISO, 2001c)

Desta maneira, o projetista pode estar a contar com um intervalo de possíveis resultados, sendo mais simples o seu dimensionamento. A norma Indiana (Standards, B.o.I., 2009) faz uma classificação de acordo com os diâmetros exteriores:

- Special Grade 70 mm. $<\phi < 100$ mm
- Grade I 50 mm. $<\phi < 70$ mm.
- Grade II 30 mm. $<\phi < 50$ mm.
- Grade III $\Phi < 30$ mm.

Uma vez que a gama de diâmetros é relativamente pequena, e que para a espécie *Phyllostachys pubescens*, a que melhor se estudou neste trabalho, não é muito raro ter diâmetros superiores a 120 mm, sugere-se que a classificação se estenda para diâmetros maiores, como por exemplo:

- Special Grade 120 mm. $<\phi$
- Grade I 90 mm. $<\phi < 120$ mm.
- Grade II 60 mm. $<\phi < 90$ mm.
- Grade III 40 mm. $<\phi < 60$ mm.
- Grade IV $\Phi < 40$ mm.

6

CASO PRÁTICO

O caso prático onde se faz o dimensionamento de uma cobertura com alguma dimensão e bastante esbelteza, tem como objetivo demonstrar que o bambu pode ser utilizado não só em estruturas relativamente simples mas também em estruturas com alguma dimensão e complexidade, sendo capaz de ser alternativa a outros materiais mais utilizados na construção civil.

6.1 PROJETO

A cobertura para o dimensionamento foi inspirada na tese de mestrado de arquitetura realizada por Vincke, I. (2012), apresentada na Universidade Técnica de Cottbus, na Alemanha em 2012.

Após uma experiência de voluntariado numa aldeia (Tiraque) da Bolívia, Isabel Vincke decidiu dedicar a sua tese de mestrado ao projeto de desenvolvimento desta pequena aldeia. Constatando a situação atual de Tiraque, Isabel propôs um projeto para um Centro de Produção cuja intenção seria dar continuidade à já existente “Escola Tata Esteban”. Este projeto inclui um grande aldeamento para os trabalhadores - ver Figura 84, construído em adobe (material local), e uma grande cobertura em Bambu - ver Figura 85 - que albergará não só os espaços integrantes do centro de produção, como todos os espaços comunitários.

“... Com as praças definidas, determina-se um elemento de “sombra” que servirá como coração do centro. Este albergará todas as funções da fábrica e funcionará também como o elemento público, que conectará as duas praças. A praça de trabalho e a social. Esta cobertura será o elemento principal do centro. Um espaço das pessoas e para as pessoas. Para esse elemento pensou-se então numa grande estrutura de bambu, material vindo das florestas tropicais localizadas cerca de Tiraque, com uma composição à escala humana e cuja intenção é que as pessoas usem e se apropriem desse elemento.” (cit. Vincke, I., 2012)



Figura 84 –Aldeamento – (cit. Vincke, I., 2012)

Sendo que o projeto teve enorme sucesso pela sua total viabilidade e proximidade da realidade local, Vincke, I. (2012) pretende agora executar o projeto. Como tal, foi pedido que se fizesse o cálculo estrutural deste grande pórtico, de modo a que se possa concretizar essa vontade.

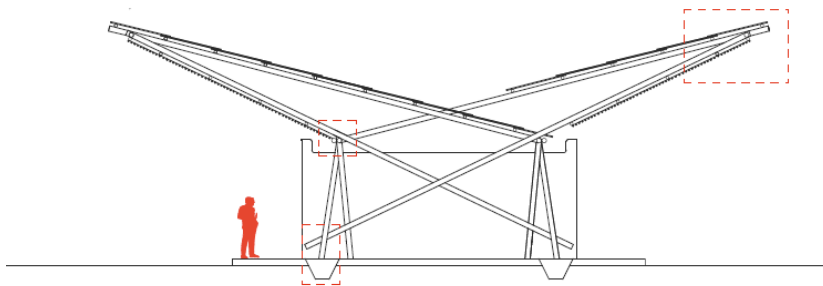


Figura 85 – Cobertura - (cit. Vincke, I., 2012)

Descrevendo sumariamente a estrutura, ela baseia-se em pórticos compostos articulados, com uma distância entre os eixos dos pórticos de 8 metros e espaçamento entre madres da cobertura de aproximadamente 1,6 metros. Como fazendo parte do estudo prévio de arquitetura, estas dimensões não foram objeto de qualquer dimensionamento, tendo tido apenas como objetivo a criação de um elemento esteticamente agradável. Daí o interesse em utilizar este exemplo na conclusão desta tese. As restantes dimensões, em metros, do pórtico podem-se ver na Figura 86.

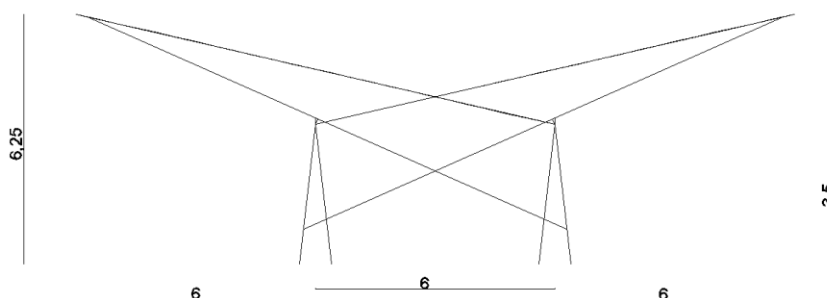


Figura 86 – Dimensões em metros do pórtico

6.2 VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DA COBERTURA

Por maior facilidade normativa, resolveu-se dimensionar esta estrutura para Portugal, zona de Lisboa, e nela utilizar a espécie biológica que, em visita ao Bambuparque, se identificou como a que melhor se poderá adaptar para utilização em estruturas da construção – *Phyllostachys pubescens*.

Para identificação das ações utilizou-se o Eurocódigo 1 (CEN, 2002), onde se identifica esta cobertura como sendo da categoria H “Coberturas não acessíveis, exceto para operações de manutenção e reparação correntes”. No Anexo Nacional da mesma norma, é indicado que se deve usar a sobrecarga para este tipo de coberturas de $0,4 \text{ kN/m}^2$ distribuída por toda a área de cobertura ou uma carga pontual 1 kN concentrada no ponto onde for mais condicionante, não atuando as duas cargas em simultâneo.

Usando a norma Colombiana para canas com 15 cm de diâmetro e uma espessura de $1,5 \text{ cm}$, iniciou-se o cálculo usando estas ações com uma conta simples de verificação do espaçamento entre madres e do vão respetivo.

Pela Norma:

Tabela 40 – Limites de tensão – segundo Ministerio de Ambiente, V.y.D.T.-R.d.C. (2012)

Estado Limite último		
Tensão limite	15	MPa
Tensão modificada (C. Perm.)	13,5	MPa
Tensão modificada (Sob. + C.P.)	15	MPa

Tabela 41 – Limites de momento fletor seção $\Phi 150\text{mm}$ e $t=15\text{mm}$

Momento máximo (C. Perm.)	2,64	kN/m
Momento máximo (Sob.+ C.P.)	2,93	kN/m

Sendo que as tensões são modificadas em função da duração da carga e que o coeficiente de modificação de carga para as cargas permanentes é de 0,9 e para a sobrecarga é de 1,6.

Considerou-se a madre simplesmente apoiada no pórtico e com secção constante.

Considerando, de modo conservador, um valor de 8 kN/m^3 para a densidade do bambu, o seu peso próprio é:

$$\text{Peso Próprio}_{\text{bambu}} = \rho * A = 8,0 * 0,0063617 \approx 0,05 \text{ kN/m} \quad (17)$$

Considerando as ações do peso próprio (desprezando-se para já o peso da chapa) e da sobrecarga uniformemente distribuída, a carga por metro é de:

$$P = 1,35 * 0,05 + 1,5 * (0,4 * 1,6) \approx 1,03 \text{ kN/m} \quad (18)$$

Sendo que o momento atuante se calcula pela seguinte expressão:

$$M = \frac{PL^2}{8} = \frac{1,03 * 8^2}{8} = 8,24 \text{ kNm} \quad (19)$$

O valor obtido para o momento é quase 3 vezes superior ao valor limite, sem ter em conta o peso da chapa e a ação do vento.

Sendo certo que a arquitetura pretende uma estrutura composta essencialmente por canas individuais e não, por grupos de canas, e que a cana escolhida tem já uma seção de dimensão considerável não sendo viável o aumento da mesma, será aconselhável diminuir o espaçamento entre madres e o vão.

6.3 ALTERAÇÃO DAS DIMENSÕES

E assim, optou-se por reduzir o vão para 6 metros e espaçamento entre madres para 1 metro.



Figura 87 – Pórtico com 1,20 m de largura

Como se pode ver pela Figura 87, para que seja geometricamente possível o cruzamento de todas as barras, a largura do pórtico é de 1,20 m, do que resulta que a distância face a face entre dois pórticos é de 4,8 m. Esta largura tem em conta uma distância de 20 cm entre eixos da cada cana, para que haja uma margem para diferentes diâmetros. Contudo, as madres apoiam apenas numa cana, não tirando partido da largura do pórtico, ou seja, continuam com um vão de 6 m.

Do ponto de vista estético, a largura do pilar tem um impacto visual grande com esta diminuição do vão das madres. Foi por isso procurada outra solução para a mesma distância entre eixos de pórticos de 6 m, chegando-se a um pórtico de 0,6 m de largura – Figura 88. Para além de ocupar menos espaço, as barras inclinadas dos pórticos que apoiam as madres são, para cada vertente, duas em vez de uma. Por esse motivo tem a vantagem que o vão das madres passa para 5,6 m.

A distância entre pórticos fica agora fixa (6m entre eixos), e caso seja necessário, reduz-se o espaçamento entre madres, começando com 1 m.

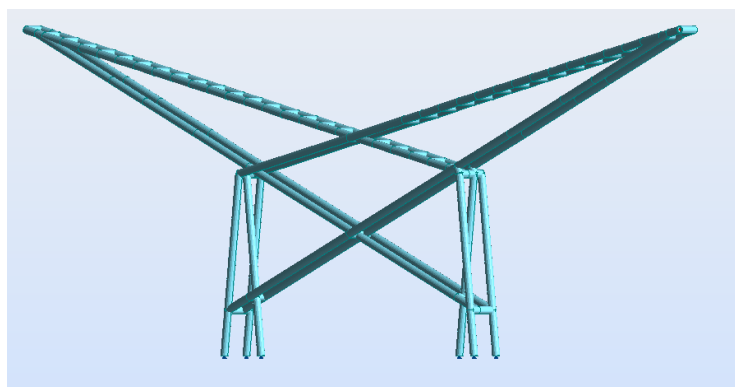


Figura 88 – Pórtico com 0,60 m de largura

Ficando fixa essa distância, pode-se ver a configuração da cobertura na Figura 89 (esquerda) com dimensões em metros. Como tem uma geometria irregular, é dividida em diferentes coberturas separadas por juntas, como se pode ver na mesma figura do lado direito.

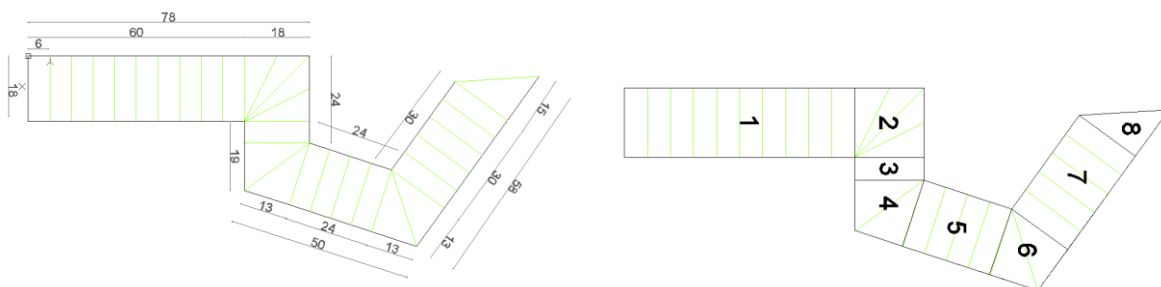


Figura 89 – Dimensões da cobertura e pórticos (esquerda) e divisão em várias estruturas isoladas (direita)

A título de exemplo, que é o que se pretende com este estudo, só foi estudada uma destas estruturas isoladas, que foi a número 1 da Figura 89, por ser a mais extensa. Sabe-se que as coberturas de canto terão de ser objeto de tratamento adequado com colocação provável de pilares isolados que permitam fazer a variação de geometria. Na união das diferentes estruturas poderá colocar-se eventualmente um pórtico duplo.

Como se pode ver na Figura 90 (esquerda e direita), existem duas águas que nunca se encontram, sendo que as dimensões em planta das mesmas estão dispostas na seguinte figura.

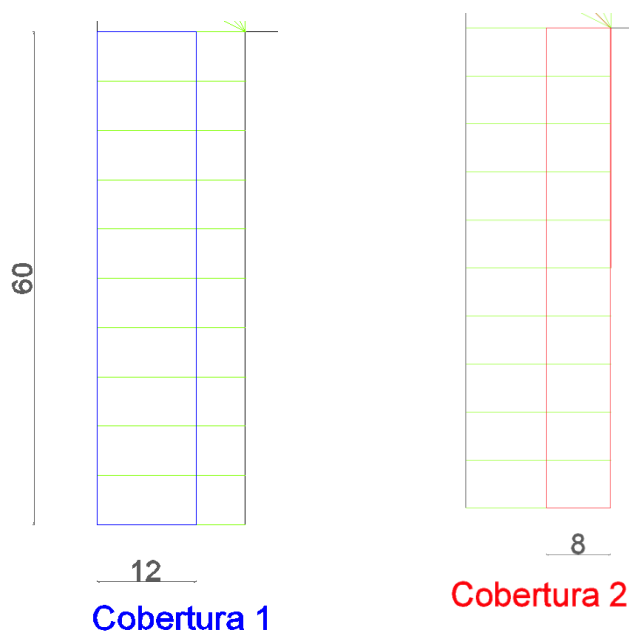


Figura 90 – Duas vertentes da cobertura

6.4 AÇÕES

6.4.1 PESO PRÓPRIO E SOBRECARGA

O material impermeabilizante para a cobertura é uma chapa simples que transmite os esforços para as madres, que por sua vez descarregam nos pórticos. Foi pesquisado que tipo de chapas de aço poderiam ser utilizadas, e pelo catálogo dum fornecedor encontrado pode ver-se qual o peso que os possíveis materiais têm. O catálogo utilizado foi o da empresa “O Feliz” (Feliz, O.) e os produtos utilizados são produtos CE.

Pelas tabelas de cálculo do catálogo acima referido pode dimensionar-se as chapas. Admitindo que as placas estão simplesmente apoiadas (umas das opções propostas pelo catálogo), e para o modelo de chapa perfilada P0-272-30 da classe S280GD, pode-se optar pela chapa de 0,5 mm de espessura para espaçamentos entre madres inferiores a 1 m. Para vãos de 1 metro, a chapa escolhida pode estar sujeita a uma carga admissível (não majorada) de $2,73 \text{ kN/m}^2$ para uma carga descendente e $2,83 \text{ kN/m}^2$ para uma carga ascendente. No final é preciso verificar que a chapa resista às cargas atuantes. A sua massa por m^2 é de $4,51 \text{ kg/m}^2$ equivalente a $0,04424 \text{ kN/m}^2$.

A distância entre o eixo de cada pórtico é de 6 metros, sendo que as madres têm um vão de 5,6 m, como já se viu atrás. Embora as madres sejam simplesmente apoiadas (esquema estrutural muito simples), utilizou-se o programa “Autodesk Robot Structural Analysis” por simplificar as combinações de carga. No programa introduziu-se um peso volúmico de 8 kN/m^3 e uma secção de 15 cm de diâmetro e uma espessura da parede de 1,5 cm. Por simplificação admitiu-se uma secção contante, pelo que se exige que estas medidas sejam as mínimas de cada cana.

O valor para o módulo de elasticidade adotado foi de 10 GPa, sendo ligeiramente superior (5,3%) ao indicado pela norma Colombiana, o que é aceitável pois a dispersão de valores obtidos nos ensaios –

capítulo 3 – é muito maior na espécie *Guadua* (adotada pela Norma Colombiana) do que na espécie *Phyllostachys*.

Para resumir, as cargas que a estrutura está sujeita são as seguintes:

- Peso Próprio das canas – Automaticamente no programa de cálculo ($\rho * A$);
- Peso Próprio da chapa – Aproximadamente 0,05 kN/m²;
- Sobrecarga da cobertura, q_k - 0,4 kN/m² distribuída pela cobertura toda;
- Sobrecarga da cobertura, Q_k - 1 kN na posição mais desfavorável;

6.4.2 AÇÃO DO VENTO

Para determinar as ações do vento segundo o EC 1-4 (CEN, 2010a) começou-se por calcular a velocidade do vento pela seguinte expressão:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (20)$$

Em que:

v_b – Valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II;

c_{dir} – Coeficiente de direção; valor recomendado pelo Anexo Nacional é 1,0.

c_{season} – Coeficiente de sazão; recomendado é 1,0.

$v_{b,0}$ - Valor básico da velocidade de referência do vento; Segundo NA-4.2(1), Nota 2 do EC 1:4, o território nacional fica dividido em duas zonas, A e B. Toma-se o valor de B, de modo conservador, com o valor de 30 m/s.

Por outro lado, sabendo que $c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$ em que $q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2$

Em que:

ρ - Massa volúmica do ar, que depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. O valor recomendado é de 1,25 kg/m³.

q_b - Pressão dinâmica de referência, tomando o valor de $q_b = \frac{1}{2} * 1,25 * 30^2 = 562,5 \text{ N/m}^2$

A categoria do terreno é a III, em que é uma “zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separação entre si de, de no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)” cit. Eurocódigo 1:4. Sendo a zona em questão um aldeamento, é apropriado tal classificação.

Finalmente chega-se ao valor da pressão dinâmica de pico, $q_p(z)$, através da seguinte expressão:

$$q_p(6,25) = c_e(6,25) * q_b = 1,55 * 562,5 = 871,88 \text{ N/m}^2 \quad (21)$$

Em que o valor de $c_e(6,25)$, se retira da figura NA-4.2 do Eurocódigo.

A estrutura em causa é uma cobertura isolada de duas vertentes com um espaçamento entre as duas. Como em redor existem edificações, considera-se um fator $\phi=1$ que é também mais desfavorável. Os valores dos coeficientes de pressão resultante, c_{pnet} , devem ir-se buscar aos quadros 7.6 ou 7.7 do EC 1:4 conforme forem de uma ou duas vertentes. Como a situação da cobertura em questão não está especificada, optou-se por considerar a cobertura com duas vertentes isoladas, sendo também a mais desfavorável.

Sendo assim, os valores dos coeficientes de pressão – $C_{p,net}$ – para as diferentes zonas, com uma inclinação de 13° , inclinação das duas vertentes, são os seguintes:

Tabela 42 – Valores do coeficiente de pressão resultante do vento

Cobertura de uma vertente		
$\alpha=13^\circ$		
$\varphi=1$	Máx	Min
Zona A	1,32	-1,6
Zona B	2,58	-2,78
Zona C	1,72	-2,88

E no EC1:4 identificam-se as zonas

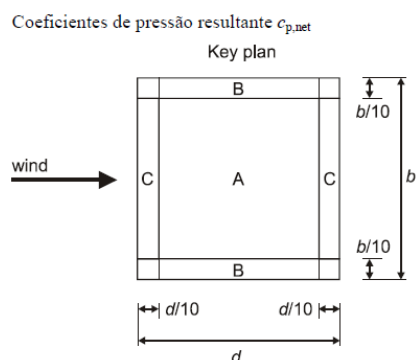


Figura 91 – Diferentes zonas para ação do vento - (cit. CEN, 2002)

Para o dimensionamento das madres interessa calcular então a pressão exercida pelo vento, w_{net} através da seguinte expressão:

$$w_{net} = q_p(z) * c_{p,net} \quad (22)$$

E para cada zona da cobertura, A, B e C calcula-se a respetiva pressão:

Tabela 43 – Pressão do vento segundo EC 1

w_{net} - Pressão do vento (kN/m^2)		
	Máx	Mín
Zona A	1,15	-1,40
Zona B	2,25	-2,42
Zona C	1,50	-2,51

Em termos de pormenor e para evitar a exposição do bambu à chuva, nas madres da extremidade, é utilizado uma chapa com 0,5 mm. Com um comprimento de 0,5 m, suficiente para esta proteção, tem de se contar com um peso de $4,51 \text{ kg/m}^2 \times 0,5 \text{ m} = 2,255 \text{ kg/m}$, que é equivalente a 0,02212 kN/m arredondado para 0,03 kN/m.

Sendo assim, e consultando a Figura 91, pode-se atribuir as zonas de A, B e C às vertentes da cobertura da seguinte forma:

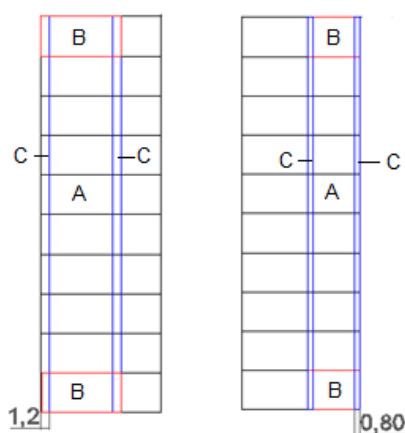


Figura 92 – Diferentes zonas para ação do vento – Dimensões em m.

6.5 DIMENSIONAMENTO DAS MADRES

Começou-se por utilizar um espaçamento entre madres de 1 m e com um vão de 5,6 m, em correspondência com o que se viu atrás. A seção utilizada é a mesma de 150 mm de diâmetro e 15 mm de espessura da parede. As ações atuantes apresentam-se na Tabela 44, de acordo com o ponto 6.4.

Tabela 44 – Ações para madres espaçadas de 1 m

	Ação	Valor	Unidades
1	Peso Próprio	Auto	
2	Peso chapa	-0,05	kN/m
3	Sob. Cobertura (qk)	-0,4	kN/m
4	Sob. Cobertura (Qk)	-1	kN
5	Vento A	-1,15	kN/m
6	Vento A-	1,4	kN/m
7	Vento B	-2,25	kN/m
8	Vento B-	2,42	kN/m
9	Vento C	-1,5	kN/m
10	Vento C-	2,51	kN/m

Para as ações da tabela anterior construiu-se as seguintes tabelas, onde se pode comparar as deformações, momentos fletores e esforço transversal resultantes do cálculo com os seus limites. Segundo o Eurocódigo 3 (CEN, 2010b), o deslocamento máximo permitido para coberturas em geral é $L/200$ para as ações permanentes. Por essa razão, optou-se por utilizar esse valor limite para as combinações frequentes de ações, que tem em conta as ações permanentes e parte das ações variáveis.

As tensões limite, mostradas na Tabela 45, estão de acordo com a norma Colombiana que dependem da duração da carga. Começa-se com um espaçamento entre madres de 1 m, verificando-se as deformadas e os esforços na Tabela 46.

Tabela 45 – Tensões e deformações limite para madres

Limite comb. Frequente ($d/L < 0,005$) 28 mm

Estado Limite último	Momento Fletor	Esforço transversal	Un.
Tensão limite	15	1,20	MPa
Tensão modificada (C. Perm.)	13,5	1,08	MPa
Tensão modificada (Sob.+ C.P.)	15	1,20	MPa
Tensão Modificada (VENTO)	24	1,92	MPa

Tabela 46 – Controlo de Deformações, Momento Fletor e Esforço transversal para madres espaçadas de 1 m.

Controlo de deformações - Madres com 5,60 metros de vão

	Espaçadas de 1 m		
Zona A	29	mm	KO
Zona B	48	mm	KO
Zona C	35	mm	KO

Controlo de Momentos Fletores (kN/m) - Madres com 5,6 metros de vão

Madres Esp. 1m	M. Atuante	M. Limite	Unidades	
Cargas Perm.	0,53	2,64	kNm	OK
Ação base Sob.	2,89	2,93	kNm	OK
Ação do vento A	7,84	4,69	kNm	KO
Ação do vento B	13,83	4,69	kNm	KO
Ação do vento C	14,36	4,69	kNm	KO

Controlo de Esforço transversal (V) - Madres com 5,6 metros de vão

Madres Esp. 1m	V. Atuante	V. Limite	Unidades	
Cargas Perm.	0,38	3,20	kN	OK
Ação base Sob.	2,06	3,56	kN	OK
Ação do vento A	5,60	5,69	kN	OK
Ação do vento B	9,88	5,69	kN	KO
Ação do vento C	10,26	5,69	kN	KO

As tensões limite, mostradas na Tabela 45, estão de acordo com a norma Colombiana que dependem da duração da carga. Começa-se com um espaçamento entre madres de 1 m, verificando-se as deformadas e os esforços na Tabela 46. Como se pode ver nas tabelas referidas, este espaçamento das madres não cumpre nenhum dos requisitos para as diferentes ações do vento, embora cumpra os requisitos para a ação base sobrecarga. Optou-se por reduzir o espaçamento das madres para 0,5 m. As cargas atuantes são metade das anteriores (da Tabela 44), exceto para a sobrecarga pontual.

Tabela 47 - Controlo de Deformações, Momento Fletor e Esforço transverso para madres espaçadas de 0,5 m

Controlo de deformações - Madres com 5,60 metros de vão

	Esp. de 0,5 m			Esp. de 0,5 m - 2canas		
Zona A	17	mm	OK	10	mm	OK
Zona B	26	mm	OK	15	mm	OK
Zona C	20	mm	OK	12	mm	OK

Controlo de Momentos Fletores - Madres com 5,6 metros de vão

	Espaçadas de 0,5 m				Espaçadas de 0,5 m - 2canas			
	M atuante	M limite	Un		M atuante	M limite	Un	
Cargas Perm.	0,4	2,64	kNm	OK	0,32	2,64	kNm	OK
Ação base Sob.	2,5	2,93	kNm	OK	1,37	2,93	kNm	OK
Ação do vento A	3,82	4,69	kNm	OK	2,03	4,69	kNm	OK
Ação do vento B	7,02	4,69	kNm	KO	3,62	4,69	kNm	OK
Ação do vento C	7,11	4,69	kNm	KO	3,47	4,69	kNm	OK

Controlo de Esforço transverso (V) - Madres com 5,6 metros de vão

	Espaçadas de 0,5 m				Espaçadas de 0,5 m - 2canas			
	V atuante	V limite	Un		V atuante	V limite	Un	
Cargas Perm.	0,29	3,20	kN	OK	0,23	3,20	kN	OK
Ação base Sob.	1,13	3,56	kN	OK	0,65	3,56	kN	OK
Ação do vento A	2,73	5,69	kN	OK	1,45	5,69	kN	OK
Ação do vento B	5,01	5,69	kN	OK	2,58	5,69	kN	OK
Ação do vento C	5,08	5,69	kN	OK	2,48	5,69	kN	OK

Como a secção se mantém a mesma, os esforços e deformada limite continuam a ser os mesmos da Tabela 45. Na Tabela 47 pode ver-se que com uma cana se resolve a zona corrente, que é a zona A, e para as restantes, é necessário recorrer a duas canas (lado a lado) em que as cargas passam a metade do valor anterior, incluindo a sobrecarga. Para essas canas, os valores da Tabela 44 devem dividir-se por 4, exceto para a sobrecarga, que é metade. Nota-se que o dimensionamento das madres foi condicionado pelos momentos fletores atuantes.

Pela Figura 92 percebe-se que um pórtico das extremidades está dentro da zona B, sendo que todas essas madres são duplas. Para a zona C, a madre de extremidade deveria ter a carga extra de 0,03 kN/m devido à chapa de proteção da chuva, mas teria metade das ações do vento, valores muito superiores. Como a zona C tem 1,20 m de largura para a vertente da esquerda e as madres estão espaçadas de 0,5 m, as 3 primeiras madres têm a área de influência dentro desta zona, sendo portanto madres duplas. Na água da direita a zona C tem 0,8 m de largura, sendo que se pode considerar que apenas as duas primeiras madres pertencem a esta zona.

6.6 DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS

A geometria do pórtico inicial é a da Figura 88 e as cargas atuantes são equivalentes a 6 metros de área de influência. Começou-se por estudar os pórticos correntes que têm como ação do vento as zonas A e C. Os pórticos de extremidade, relativos à zona B serão dimensionados posteriormente.

As ações a que cada pórtico irá estar sujeito podem-se consultar na Tabela 48. Como foi dito atrás, as extremidades das consolas têm uma chapa protetora que tem uma carga de 0,03 kN/m, e por isso há uma distinção nesses pontos para os pesos da chapa. Para o vento C, as madres de extremidade só têm metade da área de influência, devendo isso também ser considerado. Na seguinte tabela, os valores negativos correspondem a carregamentos descendentes e os positivos a ascendentes, relativamente a um eixo vertical.

Tabela 48 – Ações para pórticos

Ação	Valor	Unidades
Peso Próprio	Auto	
Peso Chapa - apoios interiores	-0,15	kN
Peso Chapa - apoios extremidade	-0,26	kN
PP madres Zona A	-0,31	kN
PP madres Zona C e B	-0,61	kN
Sob. Cobertura (qk) - apoios interiores	-1,20	kN
Sob. Cobertura (qk) - apoios extremidade	-0,60	kN
Sob. Cobertura (Qk)	-1,00	kN
Vento A	-3,45	kN
Vento A-	4,20	kN
Vento B	-6,75	kN
Vento B-	7,26	kN
Vento C	-4,50	kN
Vento C-	7,53	kN

Para o pórtico apresentado as deformações e esforços eram demasiado altos, por isso optou-se por introduzir mais umas barras para reduzir esses valores. A introdução de barras foi um processo iterativo que, no final ficou com a configuração da Figura 93 em que a secção de cana adequada para resistir às cargas atuantes do pórtico é de 160 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. Tal se poderá verificar com a apresentação dos cálculos que se seguem.

De modo a respeitar a geometria inicial, as barras originais devem ter todas o mesmo diâmetro, enquanto que as barras acrescentadas podem ser inferiores de modo a destacar as barras principais.

Os esforços axiais e os momentos fletores foram estudados para as várias combinações de carga. Os valores limite para a seção utilizada, para as canas do pórtico, podem-se observar na Tabela 49. Foram estudadas as diferentes combinações de modo a que se conseguisse cumprir todos os limites – ver Tabela 50. Os valores para os esforços de compressão não têm ainda em conta a encurvadura, uma vez que o limite varia de barra para barra.

Tabela 49 – Esforços Limite para a secção Φ 16 cm e $t=2,5\text{cm}$

Momentos Fletores			Momento Limite		
Tensão limite	15	MPa	Momento máximo (C. Perm.)	4,22	kNm
Tensão modificada (C. Perm.)	13,5	MPa	Momento máximo (Sob. + C.P.)	4,68	kNm
Tensão modificada (Sob. + CP)	15	MPa	Momento máximo (Vento)	7,49	kNm
Tensão Modificada (VENTO)	24	MPa			

Esforço Transverso			Esf. Transverso Limite (V)		
Tensão limite	1,2	MPa	V máximo (C. Perm.)	5,12	kN
Tensão modificada (C. Perm.)	1,08	MPa	V máximo (Sob. + C.P.)	5,68	kN
Tensão modificada (Sob. + CP)	1,2	MPa	V máximo (Vento)	9,09	kN
Tensão Modificada (VENTO)	1,92	MPa			

Esforço axial (tração)			Tração limite		
Tensão limite	18	MPa	Tração máxima (C. Perm.)	171,77	kN
Tensão modificada (C. Perm.)	16,2	MPa	Tração máxima (Sob. + C.P.)	190,85	kN
Tensão modificada (Sob. + CP)	18	MPa	Tração máxima (Vento)	305,36	kN
Tensão Modificada (VENTO)	28,8	MPa			

Esforço axial (compressão)					
Tensão limite	14	MPa			
Tensão modificada (C. Perm.)	12,6	MPa			
Tensão modificada (Sob. + CP)	14	MPa			
Tensão Modificada (VENTO)	22,4	MPa			

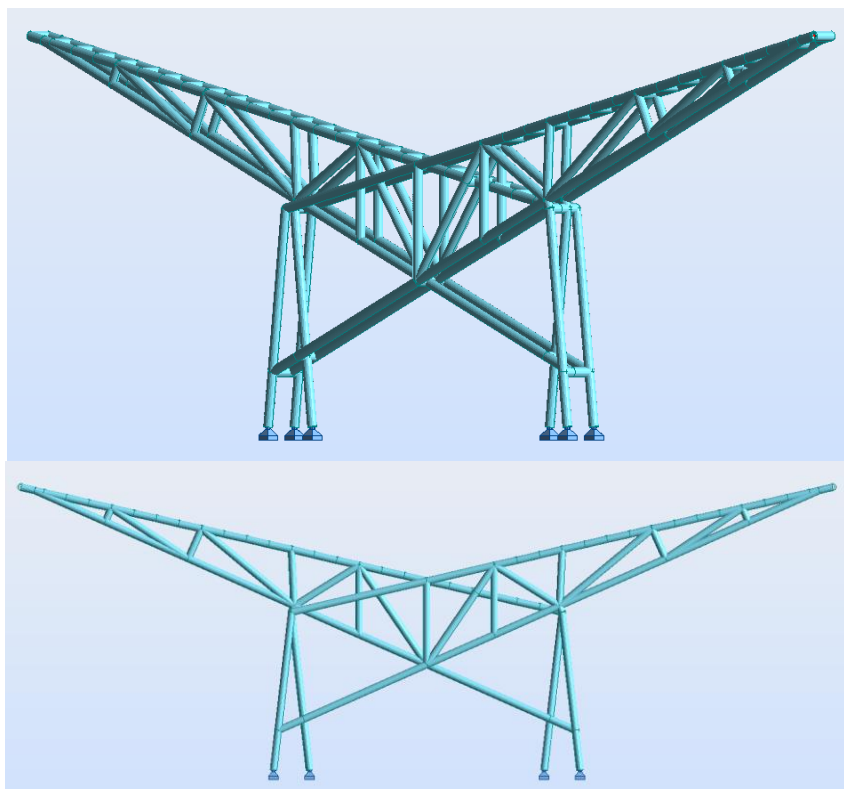


Figura 93 – Configuração final Pórtico corrente

Todas as barras adicionadas à estrutura da Figura 77 utilizadas para se chegar à configuração da Figura 93 são articuladas tendo só esforços axiais. A configuração das barras inclinadas da consola é tal que para a combinação condicionante (vento ascendente) tenham esforços de tração.

Os esforços limites de compressão dependem da encurvadura, que está diretamente relacionada com o comprimento da barra em questão. Foi utilizada a abordagem Colombiana para proceder ao cálculo da encurvadura, por ser a mais conservadora.

A análise dos esforços foi feita identificando os pontos críticos da estrutura para a combinação mais condicionante tendo em conta os diferentes esforços.

Os momentos fletores são muito pequenos, e bastante inferiores à capacidade limite, enquanto os esforços axiais atingem valores muito próximos do seu limite, sendo esses que condicionam o dimensionamento. Contudo são verificados todos os parâmetros.

A informação foi retirada do software e arrumada na seguinte tabela.

Tabela 50 – Esforços atuantes

Momentos Atuantes			V Atuante		
Cargas Permanentes	0,39	kNm	Cargas Permanentes	1,36	kN
Ação base Sob. (Sob. + C.P.)	1,05	kNm	Ação base Sob. (Sob. + C.P.)	3,83	kN
Ação do vento	2,87	kNm	Ação do vento	6,39	kN

Tração Atuante			Deformação		
Cargas Permanentes	19,5	kN	Comb. Frequente	17	mm
Ação base Sob. (Sob. + C.P.)	47,6	kN			
Ação do vento	110	kN			

Todos os esforços da Tabela 50 foram retirados das combinações mais condicionantes.

A consola tem 6 metros, podendo ser considerada como uma viga com esse comprimento, em que o seu limite de deformação são 30 mm para a combinação frequente ($L/200$). Comparando esse limite com o obtido na Tabela 50 verifica-se que o requisito de deformação é cumprido.

Os esforços de compressão são os que carecem de mais trabalho para analisar, uma vez que dependem do fenómeno da encurvadura. A Tabela 51 resume a geometria da barra com o esforço axial máximo de compressão.

Tabela 51 – Resumo das propriedades da barra axialmente mais esforçada

L	1,5	m
D	0,16	m
t	0,025	m
A	0,0106	m ²
I	2,5E-05	m ⁴
r	0,04854	m
λ	30,90	
ck	46,93	
F max (intermédio)	210,39	

Como “ λ ” é inferior a “ck” e superior a 30, a barra é considerada de dimensão intermédia, em que o esforço axial máximo permitido é de 210,39 kN. As expressões utilizadas para chegar a estes valores são as sugeridas pela norma Colombiana. O esforço axial atuante nesta barra é apenas de 113,30 kN, aproximadamente metade do máximo permitido.

Contudo, existe uma barra cujo comprimento é de 2,57 m, e é considerada comprida, em que o esforço de compressão máximo permitido é de 93,62 kN. Esta é a barra que condiciona o dimensionamento do esforço axial e tem um esforço atuante de 83,16 kN, verificando-se a segurança da estrutura.

Uma envolvente dos esforços axiais pode-se ver na Figura 94. Para o caso das barras serem consideradas compridas, o dimensionamento é feito pela carga de Euler. A norma Colombiana (adotada) apresenta um fator de segurança de aproximadamente 3. Para além disso, o módulo de elasticidade utilizado para o cálculo de “ck” não foi o valor médio, mas sim o $E_{0,05}=7,5$ GPa, valor

proposto pela mesma norma. Os valores a vermelho e a verde são os valores máximos e mínimos que o Robot fornece automaticamente, sendo que os valores negativos são de tração e os positivos de compressão.

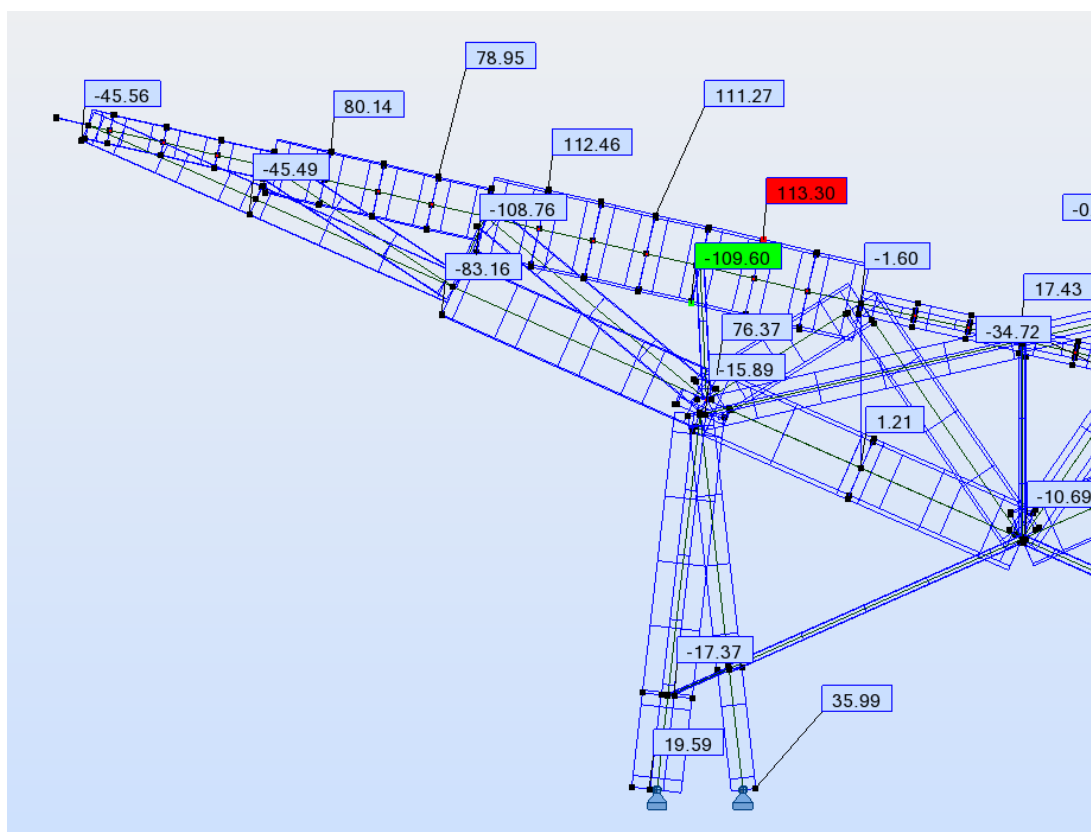


Figura 94 – Envoltória de esforços axiais

O diagrama de momentos da consola para a combinação mais condicionante que se dá com o vento ascendente, ver Figura 95, coincide também com o diagrama do momento máximo da estrutura para a envoltória de esforços. Os valores são bastante baixos, pelo que verifica a segurança. A interação com o esforço transversal e axial não é muito relevante sendo que as barras estão bastante folgadas em relação a estes esforços. Volta a aparecer o valor a vermelho, que corresponde ao valor máximo do momento fletor.

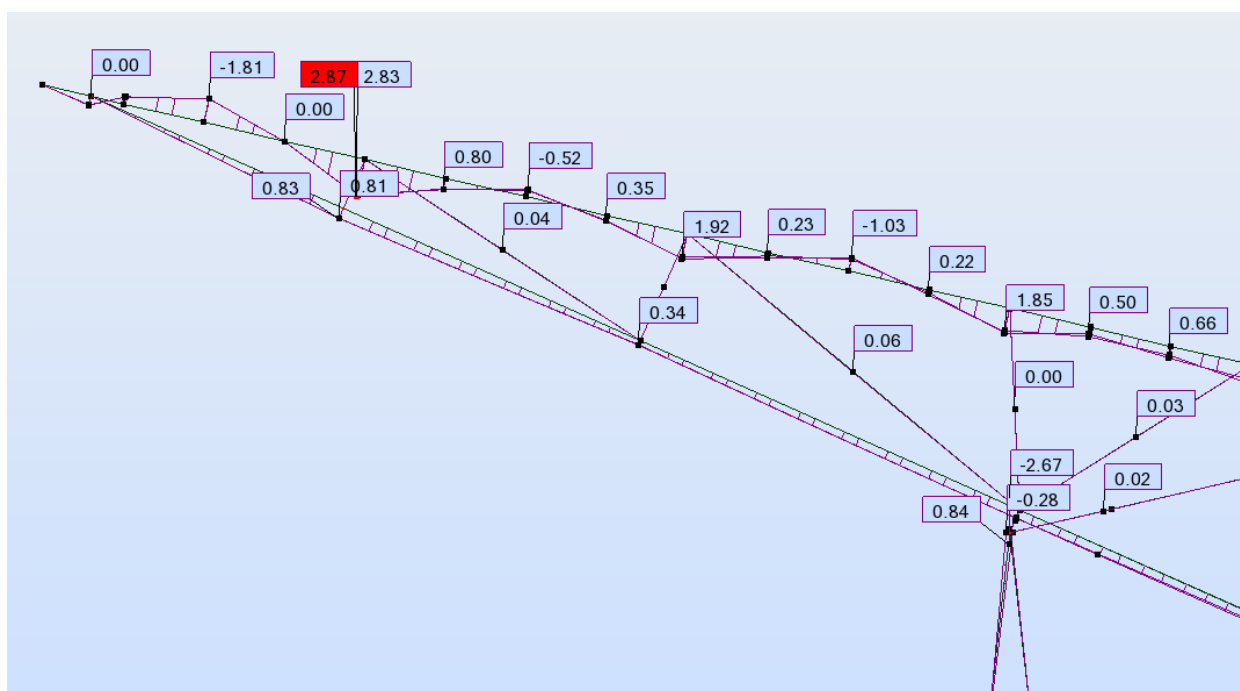


Figura 95 – Diagrama de Momentos fletores da consola para combinação condicionante

De forma a ter sensibilidade do funcionamento da estrutura, pode-se ver na Figura 96 as deformadas correspondentes às ações do vento.

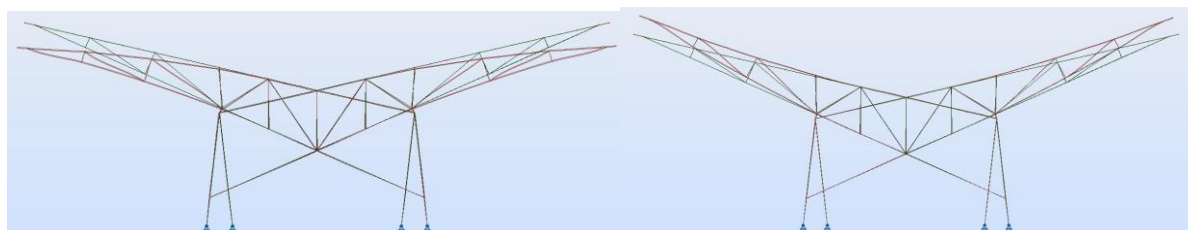


Figura 96 – Deformada da estrutura para a ação do vento descendente (esquerda) e ascendente (direita)

Os pórticos de extremidade, embora tenham uma solicitação do vento superior, só têm 3 metros de área de influência, metade dos restantes pórticos, ou seja, as cargas atuantes são como é de esperar, inferiores às cargas do pórtico corrente. Verificados os esforços pode assumir-se a mesma geometria desses pórticos, nos das extremidades. As ações podem consultar-se na Tabela 48 dividindo os valores das ações por 2, exceto a sobrecarga pontual que tem de ser considerada com o seu valor total.

6.7 PENÚLTIMOS PÓRTICOS DA EXTREMIDADE

Como é usual escolheram-se os penúltimos pórticos da extremidade para resistir às cargas horizontais. Estes são os mais solicitados para a ação do vento (zona B), e por essa razão, é provável que seja preciso reforçar estes pórticos, aproveitando para reforçar para as duas ações (vento e sismo). Para além disso, pretende-se que as ações sísmicas sejam suportadas apenas por alguns pórticos de modo a simplificar o pórtico corrente. Como se pode ver pela Figura 97, foram colocadas barras em x, neste

penúltimo pórtico, para criar um ponto de grande rigidez que possa suportar as forças horizontais. Também foram criadas barras inclinadas capazes de suportar os esforços de tração criados na direção perpendicular dos pórticos.

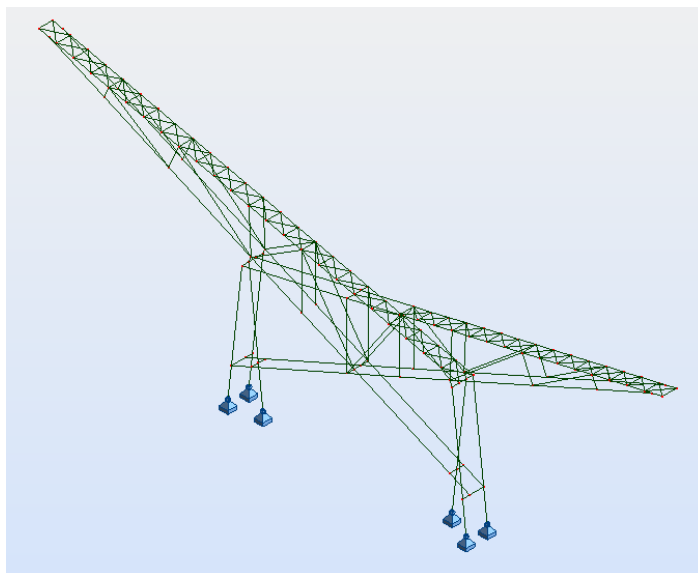


Figura 97 – Travamento para receber forças horizontais

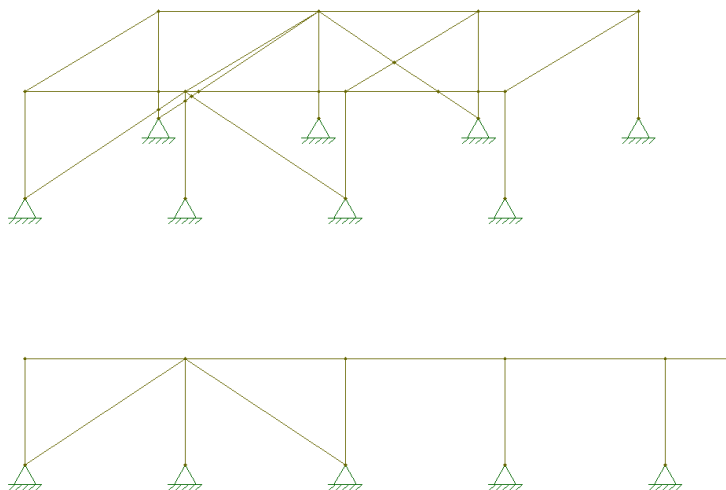


Figura 98 – Travamento não convencional do sentido longitudinal

Tradicionalmente este último travamento é feito através duma cruz entre os últimos dois pórticos, mas de forma conservativa utiliza-se só as barras que estão tracionadas. Deste modo, ao utilizar o travamento da Figura 98, apenas o segundo pórtico (a contar da esquerda) é que recebe as forças horizontais, sendo essas forças num sentido ou no outro.

Esse pórtico tem de ter a configuração da Figura 97 para que consiga ter rigidez suficiente para transmitir as forças das madres para as fundações. Esta solução foi pensada para o caso de se reforçar um só pórtico, em vez de o ter de fazer para 2 – normalmente os últimos. Do ponto de vista das ações do vento, este segundo pórtico é mais solicitado por ter uma área de influência de 6 metros, tendo do lado esquerdo a zona B (vento mais forte) e do lado direito o conjunto da zona A e C, enquanto o primeiro pórtico está apenas solicitado por metade da área de influência da zona B.

O segundo pórtico fica então responsável por acomodar os esforços horizontais (sismo) e do vento, além da sobrecarga e do peso próprio. As ações do vento, sismo e sobrecarga nunca atuam simultaneamente.

Determina-se em seguida as forças sísmicas para se determinar quais as ações condicionantes.

6.7.1 SÍSMICA

Como já dito anteriormente, analisa-se aqui apenas o troço reto de 60 metros de comprimento. É preciso analisar as direções longitudinal e do plano do pórtico. Para determinar as forças sísmicas é necessário determinar a frequência da estrutura. A partir do Eurocódigo 8 (CEN, 2009), tiram-se as acelerações do espectro de resposta para a ação sísmica condicionante, 1 ou 2. O dimensionamento é feito de acordo com o Eurocódigo e como se viu atrás, a estrutura está na localidade de Lisboa, zona que tem uma intensidade sísmica intermédia do território português. Pode ser considerada com uma classe de importância III, e considera-se um terreno do tipo D, com qualidade intermédia. As seguintes tabelas resumem as diferentes componentes relativas aos aspetos da zona, terreno e classe de importância.

Tabela 52 – Componentes dos 2 tipos de ação sísmica

Ação Sísmica Tipo 1		Ação Sísmica Tipo 2	
Zona Sísmica	agr (m/s^2)	Zona Sísmica	agr (m/s^2)
1,3	1,5	2,3	1,7

Coeficientes de importância		
Classe de Importancia	AS1	AS2
III	1,45	1,25

Tipo de terreno (D)	Smax	TB (s)	TC (s)	TD (s)
AS1	2	0,1	0,8	2
AS2	2	0,1	0,3	2

Segundo o EC8 pode-se chegar aos valores de “ag”, que é o valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A, e a partir do mesmo calcula-se o valor de “S”, que é o coeficiente do solo.

Tabela 53 - Valores de ag e S

ag (m/s^2)	S
2,175	1,608
2,125	1,625

Falta agora determinar a frequência da estrutura para saber qual as acelerações a atribuir.

O coeficiente de comportamento foi considerado de 1, uma vez que as ligações entre os elementos de bambu podem não ser capazes de dissipar energia, como se pretende. Por outro lado, não se prevê que as forças sísmicas sejam muito elevadas, devido à sua grande rigidez e pouca massa, pelo que o dimensionamento dos pórticos não será muito afetado pelas forças sísmicas.

6.7.1.1 Sentido do plano do pórtico

No sentido do plano do pórtico optou-se por utilizar um pórtico simplificado para determinar as forças sísmicas. Se estas forças se mostrarem importantes, terá de se utilizar a configuração correta.

Os pórticos correntes têm 41 pontos de apoio, em que 10 das madres são duplas, totalizando 51 madres com 6 metros de vão, sendo equivalentes a 306 metros lineares de madres com uma secção de $\Phi 150\text{mm}$ e $t=15\text{mm}$.

$$\text{Área} = 0,006361725 \text{ m}^2 = 6361,725 \text{ mm}^2 \text{ (cada madre)}$$

$$\text{Massa bambu} = \rho \cdot A \cdot \text{comprimento linear} = 800 \cdot 0,006361725 \cdot 306 = 1557,35 \text{ kg}$$

$$\text{Massa chapa} = \rho \cdot \text{Área tapada} = 4,51 \cdot 6 \cdot 20 = 541,2 \text{ kg}$$

$$\text{Massa total} = \text{Massa bambu} + \text{Massa chapa} = 2,10 \text{ ton}$$

Para determinar a rigidez do pórtico utilizou-se uma estrutura simplificada que se pode ver na Figura 99, com áreas e inércias correspondendo à adição de 3 canas para os pilares, de 2 para cada barra inclinada e 2 barras para a viga. O programa utilizado foi o F-Tool em que o valor utilizado para o módulo de elasticidade foi o mesmo utilizado anteriormente, de 10 GPa e as inércias e áreas utilizadas para calcular a rigidez são correspondentes a uma secção de cana de 16 cm de diâmetro e 2,5 cm de espessura da parede.

Duas versões foram estudadas, uma com os nós contínuos – ver Figura 99, e uma com todos os nós articulados (unidos por rótulas) – ver Figura 100. Esta última deve-se ao facto de não se poder garantir que haja continuidade de momentos entre peças.

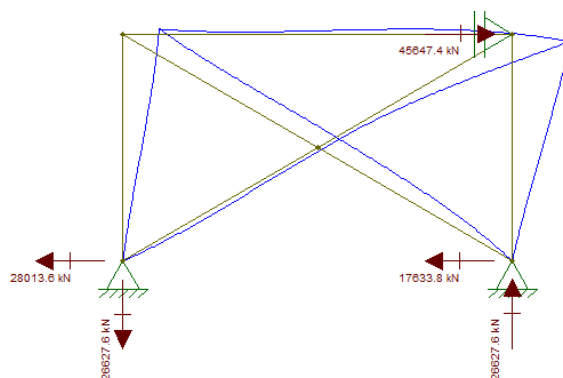


Figura 99 – Rigidez do pórtico no seu plano para nós contínuos

A rigidez do pórtico na sua direção é de 45647,4 kN/m, resultando no seguinte período (T):

$$w = \sqrt{\frac{45647,4}{2,10}} = 147,49 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f = \frac{147,49}{2\pi} = 23,47 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{23,47} = 0,0426 \text{ s}$$

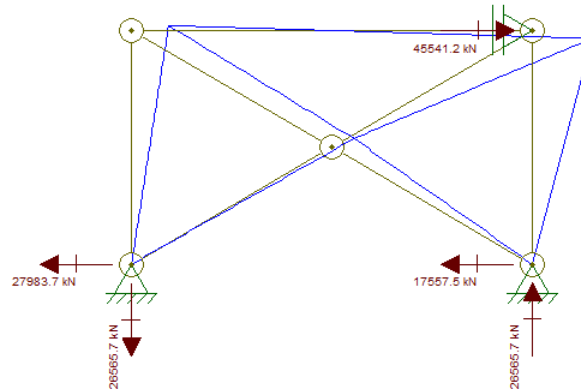


Figura 100 - Rigidez do pórtico no seu plano para nós articulados

Para a rigidez de 45541,2 kN/m, o período é de:

$$T = 0,0501 \text{ s}$$

Não havendo praticamente diferença, pode-se utilizar qualquer uma das duas opções. Esta última irá ter uma aceleração superior, pelo que é conservativo a utilização do mesmo.

A aceleração é de $6,13 \text{ m/s}^2$ (ação sísmica 1 é condicionante), e a massa é de 2,10 ton:

$$F = m * a = 2,10 * 6,13 = 12,86 \text{ kN}$$

Aplicando esta força ao pórtico, os esforços que a estrutura fica sujeita são os da seguinte figura.

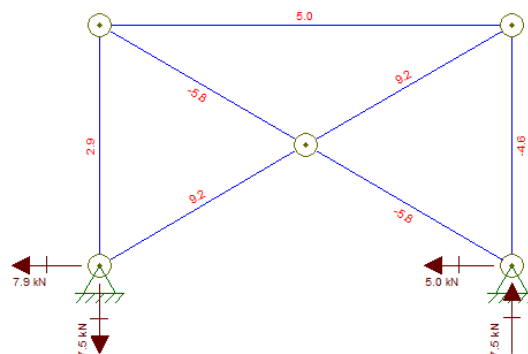


Figura 101 – Esforços resultantes das forças sísmicas no sentido do pórtico – nós articulados

Conclui-se que se está perante forças baixas que podem facilmente ser suportadas pelos pilares. Dividindo esta força pelos 3 pilares, a força máxima é de $7,9/3=2,63 \text{ kN}$, chegando a um valor

bastante inferior ao máximo permitido (9,09 kN para o corte). Os esforços axiais nas barras são muito baixos, sendo facilmente acomodados pela estrutura.

Admitindo o cenário de as barras diagonais só resistirem à tração, pode-se idealizar o pórtico da Figura 102, que também tem os nós articulados.

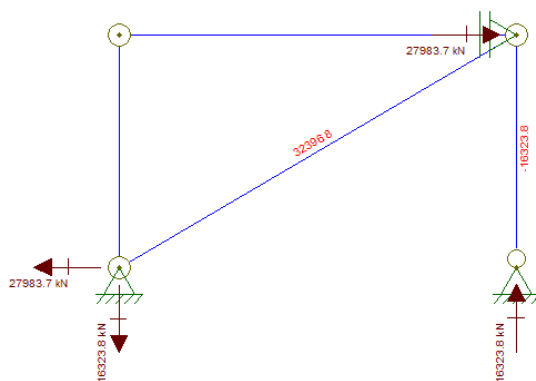


Figura 102 – Rigidez do pórtico no seu plano para nós articulados e com funcionamento só de tração

A partir da rigidez deste pórtico, chega-se ao valor do período:

$$T = 0,05441 \text{ s}$$

Para este período, a aceleração espectral é superior ao caso anterior, sendo de $6,35 \text{ m/s}^2$ (AS1), obtendo a seguinte força sísmica:

$$F = m * a = 2,10 * 6,35 = 13,33 \text{ kN}$$

A força distribuída pelas 3 canas de cada pilar é de 4,44 kN, valor ainda muito inferior ao limite.

Outro aspeto a verificar é que as barras dos pórticos que apoiam as madres suportam as forças sísmicas transferidas pelas mesmas. Sendo que a força de total é de 13,3 kN obtém-se um valor de 0,26 kN por madre (51 madres no total). Como os esforços do vento e da sobrecarga são muito superiores aos 0,25 kN, pode considerar-se que as barras dos pórticos em questão são capazes de transferir as forças para as fundações.

6.7.1.2 Sentido Longitudinal da Cobertura

No sentido longitudinal são feitas duas abordagens, em que a primeira conta que todos os pórticos contribuam para resistir às ações horizontais e a segunda conta apenas com alguns pórticos, que neste caso são os penúltimos de cada lado.

A primeira abordagem tem o peso correspondente à área de influência de um pilar, e como está isolado, é necessário que esteja encastrado.

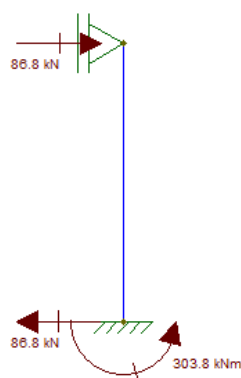


Figura 103 – Pilar Isolado

Massa bambu= $1557,35/2 = 778,68$ kg

Massa chapa= $541,2 / 2 = 270,6$ kg

Massa total= $2\ 100$ kg = $1,05$ ton

$$T = 0,69\ s$$

Verifica-se que o pilar é bastante rígido, mas por um lado é preciso garantir o encastramento de todos os pilares, e por outro lado, com esta abordagem, todos os pórticos têm de ser dotados com barras em x, como se vê na Figura 97, para garantir que as forças são transmitidas às fundações. Optou-se por não seguir esta solução de modo simplificar o pórtico corrente. Por isso, utiliza-se a abordagem de contraventar só os pórticos das extremidades – neste caso o penúltimo, um de cada lado.

Para a segunda abordagem, o contraventamento é ser feito nos penúltimos pórticos conforme a Figura 98, em que a massa total da cobertura é dividida por 2, metade para cada pórtico longitudinal, lado a lado. São 51 madres e 60 metros extensão da cobertura, o que equivale a 3060 metros lineares de madres.

Massa bambu= $800 * 0,006361725 * 3060 = 15573,50$ kg

Massa chapa= $4,51 * 60 * 20 = 5412$ kg

Massa total= $20,99$ ton

Metade da massa total= $10,5$ ton (metade para cada “pórtico longitudinal”)

Para a configuração da Figura 98 a rigidez é de 9000 kN/m, tendo um período de:

$$T = 0,215\ s$$

Para este caso, a aceleração é de $8,75\ m/s^2$ e uma massa de $10,5$ ton:

$$F = m * a = 10,5 * 8,75 = 91,76\ kN$$

Esta força de $91,76$ kN tem de ser distribuída pelas 51 madres, ficando $1,80$ kN para cada uma. Como são 2 pórticos, um em cada extremidade, esta força passa para metade ficando cada madre com $0,9$ kN. A chapa deve ser aparafusada às canas de bambu, e desta maneira a chapa trava as madres, podendo considerar-se que as madres podem estar à tração ou à compressão. Deste modo pode-se considerar que as duas extremidades da cobertura funcionam em simultâneo.

Para o cálculo das forças de inércia admitiu-se apenas a zona do pórtico corrente, sendo que as madres extra nos pórticos de extremidade, por estarem do lado de fora do travamento e por ser uma extensão relativamente pequena comparada com a cobertura total, podem ser desprezadas. Para os pontos de apoio das madres na zona C, as cargas devem ser a dobrar, ou seja, de 1,80 kN por ter 2 canas. O pórtico encontra-se entre a zona corrente (A em simultâneo com C) e a zona B, sendo que é conservativo utilizar para as cargas permanentes sempre 2 canas por madre para todo o pórtico.

Estas cargas são introduzidas no Robot de maneira a verificar que a segurança da estrutura, em que para a análise accidental sísmica, apenas entram as cargas permanentes e as forças sísmicas.

6.7.1.3 Dimensionamento do pórtico

Tendo já as cargas atuantes quer do sismo, quer das ações do vento pode-se proceder ao dimensionamento do pórtico mais solicitado. É utilizado um pórtico destes em cada extremidade.

Começa-se por verificar as ações do vento. As forças atuantes são superiores às vistas para o pórtico corrente, pelo que não se verifica a segurança com as mesmas secções de canas. O esforço axial da barra mais comprida, que foi problemática no caso anterior, tem agora 84,39 kN, inferior ao mesmo limite de 93,62 kN. Já o pilar está solicitado de 118,41 kN, que devido à encurvadura só resiste a 88,72 kN. Pode-se solucionar o problema dos pilares aumentando a sua secção para 170 mm de diâmetro e 30 mm de espessura aumentando a resistência para 133,37 kN para esta barra. O diagrama de momentos também é problemático, sendo necessário o aumento das secções das barras inclinadas (que apoiam as madres) para os mesmos 170 mm de diâmetro e 30 mm de espessura da parede. O corte que chega a valores de 7,53 kN, ainda folgado do limite 9,09 kN.

As tensões limite são as mesmas vistas na Tabela 49, sendo que para esta nova secção os esforços limites são os seguintes:

Tabela 54 – Esforços limite para a nova secção

Momento Limite			Esf. Transverso Limite		
M. máx (C. Perm.)	5,37	kNm	V máx (C. Perm.)	6,27	kN
M. máx. (Sob. + C.P.)	5,97	kNm	V máxi (Sob. + C.P.)	6,97	kN
M. máx. (Vento ou sismo)	9,55	kNm	V máxi (Vento ou sismo)	11,14	kN

Tração limite		
T. máx. (C. Perm.)	213,75	kN
T. máxima (Sob. + C.P.)	237,50	kN
T. máx. (Vento ou sismo)	380,01	kN

Para os esforços axiais, pode-se ver a envolvente na Figura 104.

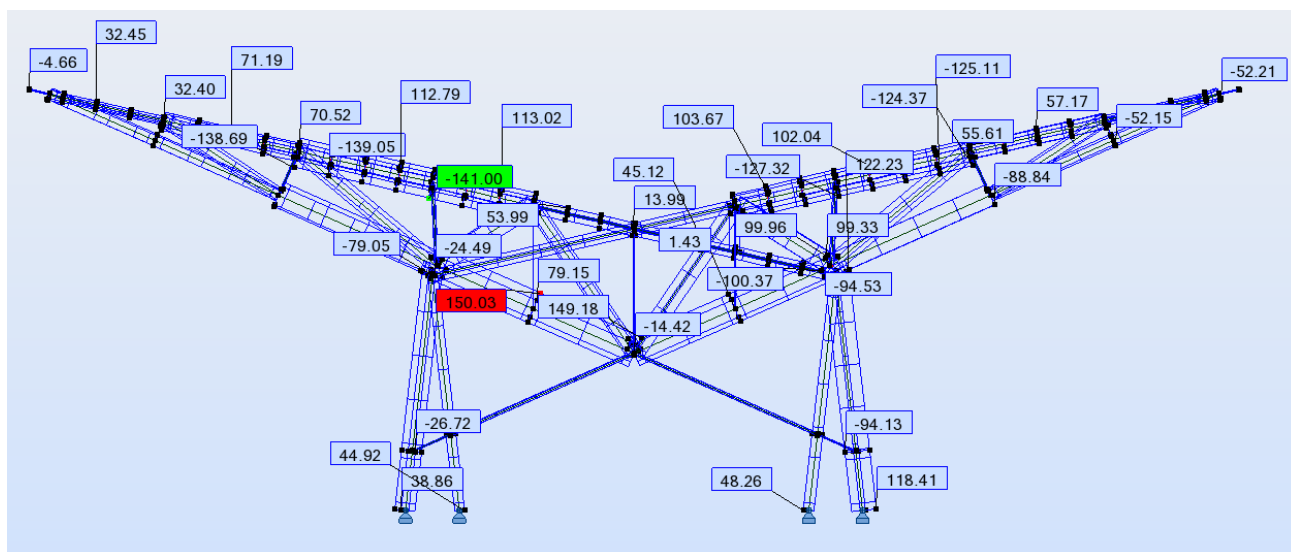


Figura 104 – Esforços axiais do pórtico de extremidade

Para este pórtico, o momento condicionante foi devido às ações do vento no sentido descendente, podendo traçar-se o seguinte diagrama:

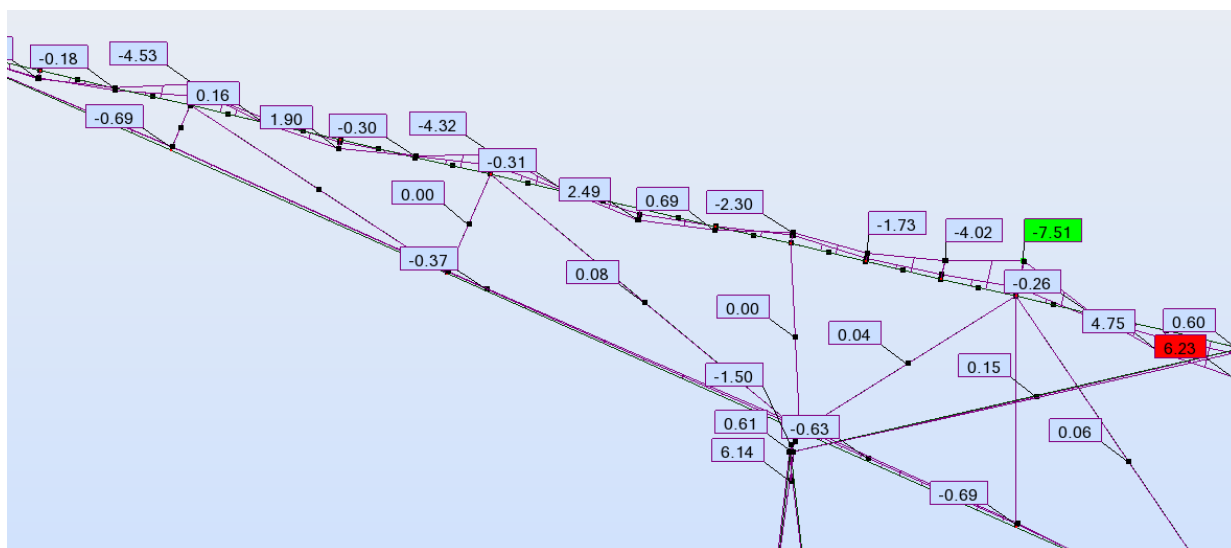


Figura 105 – Diagrama de momentos para vento ascendente

Falta ainda verificar as ações do sismo. As forças atuantes foram descritas no ponto 6.7.1.2. A configuração do pórtico dotado de travamento, admitindo apenas que as barras tracionadas é que funcionam, é dada pela seguinte figura.

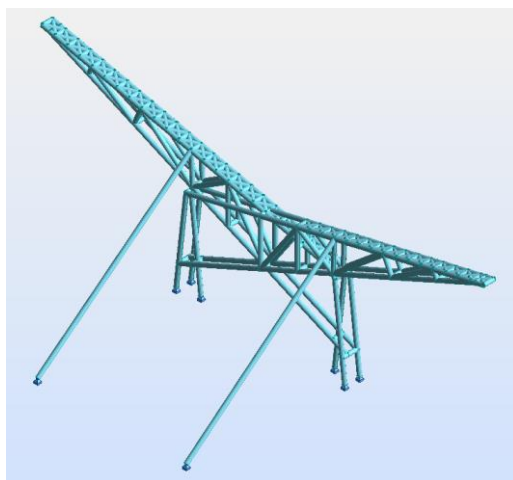


Figura 106 – Configuração do pórtico que resiste ao sismo

Devido às barras inclinadas, a deformação da estrutura é muito reduzida, sendo que os esforços de compressão máximos não passam dos 60 kN. Os valores dos momentos são todos inferiores a 1,62 kN/m, e não existem praticamente esforços transversos. Para se ter uma ideia de como são distribuídos os esforços axiais, é mostrado o formato da envolvente destes esforços. Os restantes esforços não são mostrados por não terem grande importância.

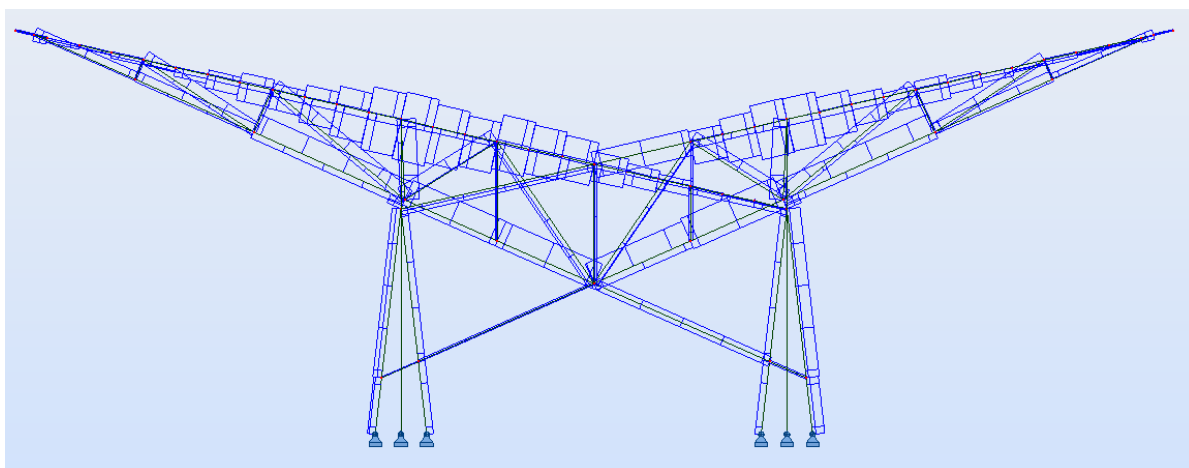


Figura 107 – Envolvente de esforços axiais para a ação do sismo

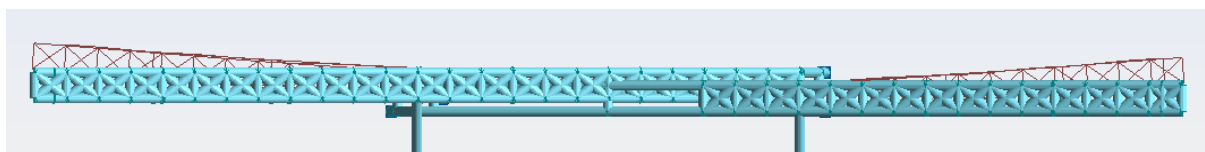


Figura 108 – Deformada resultante das ações sísmicas

Como se pode verificar, o dimensionamento do penúltimo pórtico é claramente condicionado pela ação do vento, sendo que os esforços induzidos pelo sismo são pouco importantes. A secção dos pilares e das barras diagonais que apoiam as madres teve de ser aumentada para 170 mm de diâmetro e 30 mm de espessura para que pudesse resistir a essa solicitação do vento, estando folgada para as ações sísmicas.

6.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O caso prático teve como objetivo o dimensionamento de uma cobertura em bambu, solicitado pelas ações previstas no Eurocódigo, de modo a mostrar que o bambu pode ser utilizado mesmo para estruturas com dimensão considerável. Foi verificado que a proposta de arquitetura apontada teve de ser ajustada, quer por redução dos espaçamentos entre madres e entre pórticos quer por alteração da geometria deste último, para que resistissem às ações.

A secção utilizada foi de 150 mm de diâmetro e 15 mm de espessura da parede da cana das madres. Baseado nos cálculos realizados, concluiu-se que o espaçamento entre madres deveria ser de 0,5 metros, tendo-se fixado a distância entre eixos de pórticos em 6 m. O dimensionamento das madres foi condicionado pelos momentos fletores devido à ação do vento. Para a zona central da cobertura é suficiente uma cana por madre, e para as restantes áreas de extremidade (zonas B e C), é preciso utilizar duas canas para cada madre - madres duplas.

Fizeram-se vários cálculos para o dimensionamento dos pórticos. Como se estudou apenas um troço reto da cobertura pode dividir-se a mesma contando com 2 pórticos distintos. Um resiste às ações horizontais e também ao vento mais forte (zona B), sendo esse o penúltimo pórtico de cada extremidade, e o outro corresponde aos restantes pórticos da estrutura (pórtico corrente).

Para o pórtico corrente adotaram-se secções de $\Phi 160$ mm e $t = 25$ mm para as barras principais. Para as barras que formam uma treliça as dimensões podem ser bastante inferiores, de acordo com os esforços atuantes. Algumas barras foram introduzidas com o principal objetivo de reduzir o comprimento efetivo de outras de modo a verificar à encurvadura, pelo que também podem ser bastante inferiores.

Para os penúltimos pórticos das extremidades foi visto que era necessário um aumento da secção para $\Phi 170$ mm e $t = 30$ mm de modo a resistir às ações do vento, ação condicionante para este pórtico. Estes pórticos não tiveram problemas para acomodar as ações sísmicas, tendo sido os responsáveis por resistir a esta última ação.

Com isto, fica concluída a análise estrutural e dimensionamento do troço da cobertura estudado, chegando a soluções para as madres e pórticos. É importante ter em conta que um dimensionamento mais pormenorizado deve ser feito para efeito de projeto. O objetivo deste capítulo foi demonstrar que o bambu é um material que pode ser utilizado em estruturas modernas, mesmo para geometrias bastante arrojadas arquitetonicamente como foi o caso desta cobertura.

7

CONCLUSÃO

Até os dias de hoje, de acordo com a pesquisa efetuada, em Portugal não existe nenhum trabalho feito sobre a utilização do bambu como material estrutural. Por esse motivo, espera-se que este trabalho contribua para que outras pessoas realizem obras em bambu e se investigue mais sobre este assunto. É de facto um material extraordinário com potencial para muitas finalidades, com grandes vantagens ambientais por ser ecológico e de rápida reprodução. O material é escasso na Europa, mas Portugal tem boas condições climáticas para o plantar, como prova o “bambuparque”.

Os ensaios que diversos autores já realizaram, para a determinação das características mecânicas do bambu, já são suficientemente bons e conseguem sistematizar-se para obter resultados com bastante precisão. De qualquer forma, a dispersão dos resultados é grande. Por esta razão é necessário utilizar fatores de segurança bastante elevados. Mas, passando a ser utilizado com maior frequência, poderá evoluir-se na investigação biológica para que se possa eliminar algumas condicionantes e com isso dar maior estabilidade aos resultados, melhorando a sua credibilidade. E, deste modo, poder caminhar para que se possa vir a usar fatores de segurança inferiores, aumentando inclusivamente a respetiva segurança estrutural.

Embora existam já inúmeros tipos de ligações, este tema carece ainda de muita investigação. Widyowijatnoko, A. (2012) revolucionou a maneira de pensar em relação às ligações, propondo que se agrupem conforme as transferências de forças, em vez de se agrupar por tipos de ligação. Deste modo, uma ligação de dois elementos pode pertencer a 2 grupos diferentes. Esta maneira de pensar leva a que seja mais fácil o aperfeiçoamento das ligações anteriores e também leva a que surjam novas ideias criativas. Foram estudadas várias versões e vários tipos diferentes, podendo concluir-se que a melhor ligação para tração é a ligação amarrada proposta por Widyowijatnoko, A. (2012), podendo prever-se a tensão de rotura pelo parafuso metálico. Já para esforços de compressão, a transferência de forças topo a topo é a mais eficiente, sendo por isso a mais aconselhada.

A utilização das normas é fundamental para o correto dimensionamento das estruturas. Não existindo nenhuma norma portuguesa ou europeia de estruturas de bambu, estudaram-se, para o dimensionamento das estruturas em bambu, as normas de outros países (Colombiana, Peruana e a Indiana) e a norma internacional (ISO). Concluiu-se que as edições mais recentes das normas dos países se apoiam muito na norma internacional, embora existam naturalmente aspetos práticos e de evolução local que as caracterizam, e que no global ajudam a caracterizar melhor a maneira de abordar as dificuldades.

Para o caso prático foi usada uma cobertura retirada da tese de mestrado de arquitetura de Vincke, I. (2012), tendo-se comprovado, com auxílio do robot, que o bambu é um material apto para ser utilizado em estruturas da construção. Foi feito o dimensionamento apenas dum troço dessa cobertura, para as ações previstas no Eurocódigo, sendo essas, o peso próprio da cobertura e das canas de bambu, as

sobrecargas relativas a coberturas e as ações do vento e do sismo. O dimensionamento, quer das madres, quer dos pórticos foi bem-sucedida, cumprindo o objetivo do caso prático, apesar de o processo iterativo ter exigido algumas adaptações da geometria inicial.

Espera-se que com este trabalho se tenha contribuído para o apoio do dimensionamento de estruturas de bambu, quer no que se refere ao conhecimento das propriedades mecânicas, ao modo de ligar os elementos e as normas que devem ser adotadas para o seu dimensionamento adequado.

BIBLIOGRAFIA

- Arce-Villalobos, Oscar Antonio - Fundamentals of the design of bamboo structures. Technische Universiteit Eindhoven, 1993.
- ARIAS, Julia; BACCIFAVA, Sofía; BERNARDI, Marianela; LENCINA, María Ángeles; SLINGO, Andrés - SIMÓN VÉLEZ. 2011.
- Bambuparque - Catálogo Geral.
- Beraldo, Antônio Ludovico; Albiero, Daniel; da Silva Maciel, Antonio José; Dal Fabbro, Inácio Maria; Rodrigues, Silvestre - TÉCNICA DE MOIRÉ APLICADA AL ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN EL BAMBÚ GUADUA. *Maderas. Ciencia y tecnología*. Vol. 9. (2007). p. 309-322. Disponível em WWW: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2007000300010&nrm=iso>. 0718-221X
- Berndsen, Rodrigo S. - CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA, FÍSICA E MECÂNICA DE LÂMINAS DE BAMBU (Phyllostachys pubescens). UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2008.
- CEN - Eurocódigo 1: Acções em estruturas. 2002.
- CEN - Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. 2009.
- CEN - Eurocódigo 1: Acções gerais. 2010a.
- CEN - Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço. (2010b).
- Chan, K F Chung and S L - Design of Bamboo Scaffolds. International Network for Bamboo and Rattan, 2003.
- CHEATLE, LUIS FELIPE LÓPEZ MUÑOZ and DAVID TRUJILLO - DISEÑO DE UNIONES Y ELEMENTOS EN ESTRUCTURAS DE GUADUA. *Taller Avances en la investigación sobre Guadua*. (2002).
- Chung, K. F.; Yu, W. K. - Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering Structures*. Vol. 24. n.º 4 (2002). p. 429-442. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029601001109>>. 0141-0296
- Chung, KF; Yu, WK; Chan, SL - Mechanical properties and engineering data of structural bamboo. 2002.
- Correal D, Juan Francisco; Arbeláez C, Juliana - INFLUENCE OF AGE AND HEIGHT POSITION ON COLOMBIAN GUADUA ANGUSTIFOLIA BAMBOO MECHANICAL PROPERTIES. *Maderas. Ciencia y tecnología*. Vol. 12. (2010). p. 105-113. Disponível em WWW: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2010000200005&nrm=iso>. 0718-221X
- Department of Science and Technology, Government of India - Preservation of Bamboo. 2006.
- Espelho, Jean C. C.; Beraldo, Antonio L. - Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 12. (2008). p. 645-652. Disponível em WWW: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000600012&nrm=iso>. 1415-4366
- Fei, B. H.; Liu, Z. J.; Jiang, Z. H.; Cai, Z. Y.; Liu, X. E.; Yu, Y. - MECHANICAL PROPERTIES OF MOSO BAMBOO TREATED WITH CHEMICAL AGENTS. *Wood and Fiber Science*. Vol. 45. n.º 1 (2013). p. 34-41. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000313995400006>. 0735-6161
- Feliz, O - Chapa Perfilada - Enformados a Frio.
- García, José Jaime; Rangel, Christian; Ghavami, Khosrow - Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo. *Construction and Building Materials*. Vol. 31. n.º 0 (2012). p. 52-57. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811007793>>. 0950-0618

- Ghavami, Khosrow - Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 27. n.º 6 (2005). p. 637-649. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504001337>>. 0958-9465
- Ghavami, Khosrow; Marinho, Albanise B. - Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 9. (2005). p. 107-114. Disponível em WWW: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000100016&nrm=iso>. 1415-4366
- ISO - ISO 22157:1 - Requirements. 2001a.
- ISO - ISO 22157:2 - Laboratory Manual. 2001b.
- ISO - ISO/DIS -22156 - Bamboo Structural Design. 2001c.
- Janssen, J.J.A. - Bamboo in building structures. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1981. Disponível em WWW: <<http://repository.tue.nl/11834>>.
- Janssen, Jules JA - Designing and building with bamboo. International Network for Bamboo and Rattan, 2000. 8186247467
- Jayanetti, D. L.; Follett, P. R. - Bamboo in Construction: An Introduction. (1998).
- Jayanetti, DL; Follett, PR - Bamboo in construction. Trada, UK. (1998).
- Jiang, Zehui; Chen, Fuming; Wang, Ge; Liu, Xing'e; Shi, Sheldon Q; Cheng, Hai-tao - THE CIRCUMFERENTIAL MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO WITH UNIAXIAL AND BIAXIAL COMPRESSION TESTS. *BioResources*. Vol. 7. n.º 4 (2012).
- Jung, Youngsi - Investigation of bamboo as reinforcement in concrete. United States -- Texas: The University of Texas at Arlington, 2006. Disponível em WWW: <<http://search.proquest.com/docview/304904991?accountid=43623>>. 9780542723339
- Khare, Leena - Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beams. (2007).
- Liese, Walter - Anatomy and properties of bamboo. 1985.
- Lima Júnior, Humberto C.; Willrich, Fábio L.; Fabro, Gilmar; Rosa, Maxer A.; Tanabe, Leandro; Sabino, René B. G. - Análise mecânica de pilares mistos bambu-concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 14. (2010). p. 545-553. Disponível em WWW: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000500013&nrm=iso>. 1415-4366
- Liou, N-S; Lu, M-C - Determination of Fracturing Toughness of Bamboo Culms. Time Dependent Constitutive Behavior and Fracture/Failure Processes, Volume 3. (2011). p. 353-355.
- Low, I. M.; Che, Z. Y.; Latella, B. A. - Mapping the structure, composition and mechanical properties of bamboo. *Journal of Materials Research*. Vol. 21. n.º 8 (2006a). p. 1969-1976. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000239674800012
- <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8029141>>. 0884-2914
- Low, I. M.; Che, Z. Y.; Latella, B. A.; Sim, K. S. - Mechanical and fracture properties of bamboo. *Key Engineering Materials*. Vol. 312. (2006b). p. 15-20. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.4028/0-87849-994-6.15>>. 10139826
- LOZANO, JUAN VIDAL GUTIERREZ; BARRERA, RAUL ANDRES GOMEZ - DISEÑO Y ELABORACION A ESCALA NATURAL DE ARMADURAS EN GUADUA ANGUSTIFOLIA SANTA FE DE BOGOTA D. C: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2002.
- Mahdavi, M.; Clouston, P.; Arwade, S. - Development of Laminated Bamboo Lumber: Review of Processing, Performance, and Economical Considerations. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 23. n.º 7 (2011). p. 1036-1042. Disponível em WWW: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000253>>.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - República de Colombia - NSR-10 REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. 2012.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú - DS-011 Norma Técnica - Bambú. 2012.
- Minke, Gernot - Building with Bamboo. Birkhäuser Basel, 2012.
- Mitch, D.; Harries, K.; Sharma, B. - Characterization of Splitting Behavior of Bamboo Culms. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 22. n.º 11 (2010). p. 1195-1199. Disponível em WWW: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000120>>.
- Mitch, Derek Randal - Splitting capacity characterization of bamboo culms. University of Pittsburgh, 2009.
- Moreira, L. E.; da Silva, F. J.; Rodrigues, F. C. - Novel and Non-Conventional Materials and Technologies for Sustainability. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2012. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000308846900036
- <http://www.scientific.net/KEM.517.238>>.Cap. - Design and Mechanical Tests of Bamboo Masts. 1013-9826
- Nogata, Fumio; Takahashi, Hideaki - Intelligent functionally graded material: Bamboo. *Composites Engineering*. Vol. 5. n.º 7 (1995). p. 743-751. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096195269500037N>>. 0961-9526
- Obataya, Eiichi; Kitin, Peter; Yamauchi, Hidefumi - Bending characteristics of bamboo (Phyllostachys pubescens) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood Science and Technology*. Vol. 41. n.º 5 (2007). p. 385-400. 0043-7719
- Obermann, Ronald Laude; Tim Martin - bambu: Recurso sostenible para estructuras espaciales. universidad nacional de colombia, 2003/2004.
- OSORIO SARAZ, JAIRO ALEXANDER; ESPINOSA BEDOYA, ALBEIRO; GARCÍA GALEANO, EDUARD A. - EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA GUADUA CON UN MODELO MATEMÁTICO. *DYNA*. Vol. 76. (2009). p. 169-178. Disponível em WWW: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000400016&nrm=iso>. 0012-7353
- Pereira, Lia Viégas Garbino and Marco Antonio dos Reis - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO BAMBU. (2004).
- RABELO, IVAN DARWICHE - PROPRIEDADES MECANICAS DAS CONEXÕES DE ESTRUTURAS ESPACIAIS DE BAMBU MOSSO ROLICO. (2009).
- Sharma, Bhavna; Harries, Kent A.; Ghavami, Khosrow - Methods of determining transverse mechanical properties of full-culm bamboo. *Construction and Building Materials*. Vol. 38. n.º 0 (2013). p. 627-637. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812006629>>. 0950-0618
- Sinha, Arijit; Way, Daniel; Mlasko, Skyler - Structural Performance of Glued Laminated Bamboo Beams. *Journal of Structural Engineering*. (2013). 0733-9445
- Standards, Bureau of Indian - Structural Design using Bamboo - Code of Practice. 2009.
- Takeuchi Tam, Patricia; González, César Emilio - Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y universidad*. Vol. 11. n.º 1 (2007). p. 89-104. 0123-2126
- Tan, T.; Rahbar, N.; Allameh, S. M.; Kwofie, S.; Dissmore, D.; Ghavami, K.; Soboyejo, W. O. - Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*. Vol. 7. n.º 10 (2011). p. 3796-3803. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706111002455>>. 1742-7061
- Tang, L. Z. - Novel and Non-Conventional Materials and Technologies for Sustainability. 2012. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000308846900043
- <http://www.scientific.net/KEM.517.290>>.Cap. - How to Build Affordable but High Quality Houses for Villagers: Appropriate design for Aini Vernacular Houses in Xishuangbanna. 1013-9826
- Tirelli, Zaira Postal - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO BAMBU NA CONSTRUÇÃO UTILIZANDO REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. (2007).

- Torres, LA; Ghavami, K; García, JJ - A transversely isotropic law for the determination of the circumferential young's modulus of bamboo with diametric compression tests. *Latin American applied research*. Vol. 37. n.º 4 (2007). p. 255-260. 0327-0793
- Vaessen, Maarten J; Janssen, Jules JA - Analysis of the critical length of culms of bamboo in four-point bending tests. *Heron*. Vol. 42. n.º 2 (1997). p. 113-124. 0046-7316
- Van Der Lugt, Pablo; Van den Dobbelsteen, AAJF; Abrahams, Ruben - Bamboo as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo (products) in Western Europe. *Journal of Bamboo and Rattan*. Vol. 2. n.º 3 (2003). p. 205-223. 1569-1586
- Vasconcellos, Raphael Moras de - Bambúes en Brasil, una Visión Histórica y Perspectivas Futuras. (2006).
- Vidiella, Àlex Sánchez - Bamboo. 2011.
- Vincke, Isabel - Centro de Produção de Tiraque, Bolívia. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2012.
- Widyowijatnoko, Andry - TRADITIONAL AND INNOVATIVE JOINTS IN BAMBOO CONSTRUCTION RWTH Aachen University, 2012.
- X. B. Li, T. F. Shupe, G. F. Peter, C. Y. Hse & T. L. Eberhardt - CHEMICAL CHANGES WITH MATURATION OF THE BAMBOO SPECIES PHYLLOSTACHYS PUBESCENS. *Journal of Tropical Forest Science*. (2007). p. 6–12.
- Xiao, Y.; Zhou, Q.; Shan, B. - Design and Construction of Modern Bamboo Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. Vol. 15. n.º 5 (2010). p. 533-541. Disponível em WWW: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000089>>.
- Yu, W. K.; Chung, K. F.; Chan, S. L. - Axial buckling of bamboo columns in bamboo scaffolds. *Engineering Structures*. Vol. 27. n.º 1 (2005). p. 61-73. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029604002883>>. 0141-0296
- Zhou, Q.; Shan, B.; Xiao, Y. - Design and construction of a modern bamboo pedestrian bridge. Boca Raton: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2008. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000265332100024>. 978-0-415-47597-6